Université de Lyon

Université Jean Moulin Lyon III

CNRS – UMR 5600 Environnement Ville Société

Centre de Recherche en Géographie et Aménagement

Laboratoire Climatologie Risque Environnement

Le risque pluvial en milieu urbain. De la caractérisation de l'aléa à l'évaluation de la vulnérabilité : le cas du Grand Lyon

Florent RENARD

Thèse de doctorat de Géographie et Aménagement

Pour obtenir le grade de Docteur de l'Université Jean Moulin Lyon 3

Dirigée par Jacques COMBY,

Professeur des Universités, Université Lyon 3 – CNRS UMR 5600 EVS

Présentée et soutenue publiquement le 13 décembre 2010

Devant un jury composé de :

Sylvain Bigot	Professeur des Universités, Université Grenoble 1	Rapporteur
Bernard Chocat	Professeur des Universités, INSA de Lyon	Examinateur
Jacques Comby	Professeur des Universités, Université Lyon 3	Directeur
Hervé Piégay	Directeur de Recherche, CNRS UMR 5600	Examinateur
Jean-Pierre Vigneau	Professeur des Universités, Université Paris 10	Rapporteur
Emmanuelle Volte	Ingénieur territorial, Grand Lyon	Invitée

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier chaleureusement mon directeur de thèse, Jacques Comby, pour son encadrement, sa confiance, et la liberté de recherche qu'il m'a accordée pour mener à bien ce travail. Je tiens également à remercier fortement Emmanuelle Volte, pour m'avoir accueilli dans l'Unité Etudes Générales et Modélisation de la Direction de l'Eau du Grand Lyon.

Je remercie les membres du jury qui ont accepté de lire et d'évaluer ce travail. Sylvain Bigot (université Grenoble 1, LTHE), pour ses encouragements et ses recommandations dès mes premières communications aux journées de climatologie de la Commission Climat et Société du CNFG ; Bernard Chocat (INSA de Lyon, LGCIE), pour ses conseils et ses observations tout au long de ces années de collaboration, dans un premier temps à l'OTHU puis ensuite à la Direction de l'Eau ; Hervé Piégay (CNRS UMR 5600) et Jean-Pierre Vigneau (Université Paris 10).

Je remercie particulièrement mes collègues de l'Unité Etudes Générales et Modélisation : Jean-Marc Didier et Pascal Bret pour les formations et les astuces sur *Canoe*, Frédéric Savatier (le pluvio-maître), Karine Blanc, Serge Perdrix, Didier Fangeat, François Reynal et Gaël Lorini, ainsi que Matthieu Mureau de l'Unité Géomatique pour son aide sur *Arcgis* (*Model Builder* en particulier).

Je tiens à témoigner de ma reconnaissance à tous les agents du Service Etudes de la Direction de l'Eau, en particulier à la responsable Elisabeth Sibeud, ainsi qu'à Isabelle Soarès, Céline de Brito et Anne-Sophie Charpentier pour leurs conseils.

Merci à Benoît Thomé, Georges Dufour, Jean-Louis Vallée et Alain Brisson de la Division Interrégionale Centre-Est de Météo-France pour les informations sur le radar, ainsi qu'à Jean-Louis Champeaux de la Direction des Systèmes d'Observation et à Jean-Michel Soubeyroux de la Direction de la Climatologie de Météo-France.

Merci à toutes les personnes qui m'ont conseillé lors des réunions et des manifestations de l'OTHU. Je pense en particulier à Sylvie Barraud et à Jean-Luc Bertrand-Krajewski, ainsi qu'à leurs collègues du LGCIE de l'INSA de Lyon, Frédéric Cherqui, Gislain Lipeme-Kouyi et Pascal le Gauffre. Je remercie aussi Isabelle Braud et Etienne Leblois du Cemagref de Lyon, pour les échanges enrichissants au sein du programme de recherche Avupur, Dominique Faure d'Alicime et Thomas Einfalt d'Hydro & Meteo pour leurs conseils sur le radar météo, et Saïda Kermadi de l'Université Lyon 2.

Des remerciements très chaleureux à Chantal Gérard, dernière responsable du pôle documentaire de l'UMR 5600 du CNRS, pour son aide dans les recherches bibliographiques et pour les vacations.

Je remercie vivement le département de géographie de l'Université de Poitiers, qui m'a fait confiance en m'accordant ma première année d'ATER, en particulier Michel Desse, Daniel Peyrusaubes, Véronique Lassailly-Jacob, Michel Périgord, Christophe Imbert, Marie Groult, Bénédicte Thibaud, Mohamed Taabni, Nathalie Daudin et Hélène Simon-Lorrière.

Je remercie également l'Institut de Géographie Alpine de l'Université de Grenoble 1, pour m'avoir recruté pour ma seconde année d'ATER, notamment Marie-Christine Fourny, Sandra Rome, Sylvain Bigot, Céline Lutoff, Pascal Mao, Nathalie Dubus et Elise Beck.

Merci à mes amis coauteurs de publications dans des revues : Jérémie Riquier (Norois), Adama Sarr (Sécheresse), et Pierre-Marie Chapon (l'Espace géographique, Geographica Helvetica, Etudes Foncières, Urbia, les Annales de géographie) ; ainsi qu'aux relecteurs (anonymes ou non) qui ont permis d'améliorer ces articles.

Merci aux stagiaires que j'ai encadrés et qui m'ont permis d'accélérer mon travail : Jérémie Riquier, Florence Braillon, Charlotte Panou, Julia Fuchs, Romain Viard-Gaudin, Lola Sanchez, Jean-David Fourchon, Jill Valentine et Rebecca Redfield.

Je remercie toutes les personnes qui ont pris le temps de participer en tant qu'experts à l'évaluation de la vulnérabilité du Grand Lyon.

Je tiens à remercier toutes les personnes que ce doctorat m'a permis de rencontrer et qui sont devenus des amis, en particulier Pierre-Marie Chapon, Adama Sarr, Damien Granger, Nicolas Caradot, Carina Furusho, Céline Bécouze, Marjolaine Métadier, Didier Soto, Anne-Julia Rollet, et mes collègues Cifre du Grand Lyon, Hafid El Maghnouji, Muriel Delabarre et Anne-Line Gandon.

Les dernières lignes reviennent forcément à ma Julie Freyssenge, pour ses relectures, ses corrections, ses conseils, ses encouragements, ses critiques ; mais surtout pour tout le reste.

À Julie,

Résumé

Le milieu urbain et son imperméabilisation associée conduisent à collecter et à transporter des quantités d'eau de pluie de plus en plus considérables. Ces eaux ruisselées provoquent un accroissement des volumes et des débits de pointe dans le système d'assainissement, véritable réseau hydrographique artificiel urbain. Cet excédent d'eau occasionne des inondations chroniques et sévères (OTHU, 2008). La question du risque pluvial fait ainsi partie des enjeux notoires de la ville. Sa maîtrise est indispensable pour permettre un développement durable du milieu urbain.

Cette thèse, réalisée dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) avec la direction de l'eau de la communauté urbaine de Lyon, répond à deux objectifs majeurs. Le premier, fondamental, améliore la connaissance de la pluie sur le Grand Lyon. Le second, plus tourné vers l'opérationnalité, vise à approfondir les relations entre les types de pluies et les débordements, ainsi qu'à apporter des solutions méthodologiques et pratiques en vue de l'évaluation de la vulnérabilité urbaine.

L'amélioration de la connaissance de l'aléa pluvial du Grand Lyon nécessite le recours à plusieurs échelles temporelles et spatiales. L'accent a ici été mis sur une caractérisation à l'échelle locale, peu étudiée jusqu'à présent sous la forme d'une approche climatique et météorologique (contrairement aux travaux fondés sur une démarche d'hydrologie urbaine). Cette étude repose sur l'usage de deux outils complémentaires : le réseau de mesure au sol et le radar météorologique. D'une densité forte, le réseau de mesure au sol de l'agglomération fournit des données ponctuelles qu'il est nécessaire d'interpoler afin d'améliorer à la fois la vision globale du phénomène pluvieux et de mieux décrire l'hétérogénéité de la dimension spatiale de la pluie. Une évaluation des méthodes d'interpolation a donc précédé une analyse variographique, confortée par des séries d'interpolation à pas de temps fin. Le déplacement de noyaux de pluie intense a été mis en évidence, traduisant de manière globale une trajectoire orientée de 40°N environ, du sud-ouest au nord–est.

Ces premiers résultats, obtenus à l'aide du réseau de mesure au sol, ont été confrontés aux observations issues de l'exploitation du radar météorologique. Une évaluation par simulation puis à l'aide de données réelles a indiqué la fiabilité de cet outil. Ce dernier a permis une étude dynamique descriptive des noyaux de pluies intenses, de leurs caractéristiques tels que leurs intensités maximales, leurs superficies, leurs formes, ou

encore de leurs trajectoires et de leurs évolutions. Les résultats obtenus ont montré une forte adéquation avec les résultats issus du réseau de mesure au sol. Ils ont aussi permis d'affiner les informations issues de l'analyse des données pluviométriques, révélant l'intérêt d'un réseau de mesure au sol, sous certaines conditions (de densité notamment). Cette amélioration de la connaissance de la pluie a permis de mieux cerner les risques associés et leurs conséquences sur les réseaux par un croisement avec les débordements.

En complément, les observations de débordements sur le terrain ont été comparées spatialement aux débordements issus de la modélisation du réseau d'assainissement. Les résultats de cette comparaison spatiale se sont révélés très concordants, et l'étude globale de la distribution des débordements a montré la nécessité de connaître d'une manière précise les différents enjeux du territoire et d'en estimer la vulnérabilité. Cette évaluation, fondée sur une méthode conçue pour l'aide à la décision, repose sur le recoupement d'une analyse hiérarchique multicritère croisée avec des entretiens d'experts. Elle a montré la prépondérance de ce qui a été qualifié de « vulnérabilité humaine », ce qui se traduit par un gradient de vulnérabilité décroissant du centre de l'agglomération à sa périphérie, avec quelques nuances cependant, liées à la vulnérabilité environnementale. Ces cartes de vulnérabilités, couplées avec des zonages d'aléas préexistants, permettent une lecture des risques associés plus fine qui rend ainsi plus aisée la décision des gestionnaires du territoire de l'agglomération urbaine de Lyon. Cette démarche présente un caractère novateur fortement utile car les réflexions sur les risques d'origine pluviale étaient jusqu'alors fondées uniquement sur les seules cartographies d'aléas.

Mots clés : risque pluvial – aléa – vulnérabilité – inondation – ruissellement – pluviomètre – radar météorologique – méthodes hiérarchiques multicritères - aide à la décision - SIG

Abstract

The urban environment and its associated sealing lead to collect and transport quantities of rainwater increasingly significant. These surface water flows cause increasing volumes and peak in the wastewater system. This excess water causes chronic and severe floods (OTHU, 2008). The question of rainfall risk is thus part of the issues of the city. His management is essential to enable sustainable development of urban areas.

This PhD, written thanks to a Convention Industrielle de Formation par la Research (CIFRE) with the Water Direction of the urban community of Lyon, has two major objectives. The first one, fundamental, is to enhance the knowledge of the rain in the Greater Lyon. The second, more forward-operability oriented, aims to develop relations between the types of rains and overflows, and provide solutions and practical methodology for assessing urban vulnerability.

Improving the knowledge of the storm hazard of Greater Lyon requires multiple temporal and spatial scales. The focus here has been on a characterization at the local scale, not enough studied until now as in a climate and weather approach (unlike the work based on an approach to urban hydrology). This study is based on the use of two complementary tools: the network of ground measurements and weather radar. In a high density, the network of ground measurement of agglomeration provides punctual data that it is necessary to interpolate in order to improve both the overall vision of the phenomenon rainfall and better describe the heterogeneity of the spatial dimension of the rain. An evaluation of interpolation methods has preceded a variography, reinforced by a series of short time step interpolation. The displacement of cores of heavy rain was revealed, reflecting a trajectory globally oriented approximately 40 °N, south-west to north-east.

These first results obtained using the network of ground measurements were compared with observations from the weather radar. An evaluation by simulation and then using real data indicated the reliability of this tool. It allowed a dynamic descriptive study of the rainfall cores, their characteristics such as their maximum intensities, their areas, their shapes, or yet their trajectories and their evolution. The results showed strong agreement with the results from the network of ground measurements. They also helped refine the information obtained from the analysis based on rain gauges, revealing the value of a network of ground measurement, under certain conditions (especially density). This improved

knowledge of the rain has helped to identify risks and their consequences on the sewerage system by a junction with the overflows.

In addition, observations of overflows on the field were spatially compared to overflow from the modeling of the sewerage network. The results of this spatial comparison were very reliable, and study of the distribution of overflows has shown the need to know with precision the various issues of territory and to estimate their vulnerability. This assessment is based on a method designed for decision support, relying on the intersection of a hierarchical multicriteria analysis crossed with interviews of experts. It showed the importance of what has been called "human vulnerability", which translates into a gradient of decreasing vulnerability of the urban center to its periphery, with some nuances, however, related to environmental vulnerability. These vulnerability maps, coupled with existing zoning of hazards, provide a reading of risks which makes the decision easier for land managers in the Greater Lyon. This approach is innovative because the reflections on the risk of pluvial origin were previously based solely on the only maps of hazards.

Keywords: rainfall risk – hazard – vulnerability – flooding – run-off – raingauge – weather radar - analytic hierarchy process – decision support - GIS

Sommaire

Remerciements **3**

Résumé **6**

Abstract **8**

Sommaire **10**

Introduction générale **12**

Cadre thématique du risque d'inondation en milieu urbain 13
Choix de la zone d'étude et contexte administratif 22
Résultats des études antérieures : un apport réel mais une connaissance de la pluie encore partielle 28
Objectifs, partenariats et structuration de la thèse 32

Chapitre 1 Un réseau de mesure dense et fiable pour une caractérisation fine de l'aléa pluvial lyonnais **36**

Partie 1 : Des mesures au sol qui nécessitent le recours à l'interpolation spatiale **37**
1. Exploitation d'un réseau de mesure au sol : principes et instrumentation 39
2 La nécessité de l'interpolation spatiale des précipitations 70

Partie 2 : Caractérisation fine de l'aléa pluvial du Grand Lyon à l'aide du réseau de mesure au sol **98**
1. De plus fortes hauteurs d'eau sur l'est lyonnais lors des longues périodes 99
2. Des tendances communes dans les répartitions spatio-temporelles des cumuls des épisodes pluvieux 107

Chapitre 2 Le radar météorologique : un outil performant dont la qualité de mesure est à évaluer avant son utilisation dans la caractérisation de l'aléa pluvial **137**

Partie 1 : Une qualité de mesure en constante progression pour une caractérisation fine des épisodes pluvieux **138**
1. Principes de fonctionnement du radar météorologique et limites de la mesure 139
2 Des caractéristiques et des données qui dépendent de la localisation du radar 147
3 Une qualité de mesure du radar en nette amélioration 162
4 Comparaison des valeurs du radar aux données au sol 192
5. Le recours à l'interpolation spatiale pour une couverture complète de données 206

Partie 2 : Le radar météorologique permet une étude fine de la dynamique descriptive de l'aléa pluvial 215
1. Un suivi des caractéristiques des noyaux de pluie intense par SIG.....216
2. Application de la méthode aux épisodes intenses et mise en évidence de comportements similaires 234

Chapitre 3 Les impacts de l'aléa pluvial sur le système d'assainissement nécessitent une évaluation de la vulnérabilité territoriale 287

Partie 1 : Mise en évidence de relations entre débordements et pluies 288
1. Une base de données fiable et puissante 290
2 Relations entre débordements et types de pluies.....301
3 Comparaison spatiale entre débordements observés et modélisés.....333

Partie 2 : Une méthode hiérarchique multicritère d'aide à la décision pour l'analyse de la vulnérabilité territoriale..... 348
1. La diversité des évaluations de la vulnérabilité urbaine.....349
2 La nécessité de recourir à des méthodes d'aide à la décision.....354
3 Principes méthodologiques de l'AHP et application au territoire d'étude 362
4 Une vulnérabilité centrée sur le cœur urbain.....377

Conclusion générale 389

Références bibliographiques 397

Liste des figures 429

Liste des tableaux 441

Annexes..... 445

Table des matières 523

Introduction générale

Cadre thématique du risque d'inondation en milieu urbain

Un projet de thèse s'inscrivant dans un programme scientifique au service du Grand Lyon

---

Le risque d'inondation en milieu urbain est une problématique majeure des opérations d'aménagement actuelles. En effet, l'analyse de la variabilité spatiale et temporelle des précipitations constitue une préoccupation forte des gestionnaires et des élus des collectivités. La distribution spatiale et temporelle des précipitations sur la communauté urbaine de Lyon présente une dimension aléatoire marquée, forte de conséquences sur la gestion des eaux en milieu urbain. De surcroît, les critères d'analyse développés dans les études dont elle a fait l'objet répondent mal en termes d'échelle à une problématique urbaine, ce qui ne facilite pas la gestion des flux hydriques urbains.

Cette situation conduit à une gestion difficile des pluies, favorable à l'apparition de fortes nuisances. Si les inondations sur le Grand Lyon n'ont pas le caractère spectaculaire des crues méditerranéennes et si elles ne se traduisent pas par des sinistres d'une ampleur équivalente, il reste vrai qu'elles sont la cause de nuisances non négligeables et de contraintes réelles aux activités socio-économiques. En effet, chaque année, les dommages aux biens et les coûts économiques sont considérables, notamment par la submersion de biens publics et privés. Elles provoquent en outre des perturbations fortes, par la coupure des voies de communication en particulier, qui ont des répercussions directes sur les activités économiques et sociales de la communauté urbaine.

Le nombre de sinistres qui font l'objet d'indemnisation est ainsi élevé, plusieurs dizaines par an, et le risque d'événement grave mettant en danger la vie de personnes n'est pas exclu (Chocat, 2002). A titre d'exemple, l'événement du 10 juin 2000 sur le secteur nord de l'agglomération a occasionné 720 000 euros de dommages environ (Druot, 2003), et celui

du 2 décembre 2003 approximativement 650 000 euros, sur les biens du domaine public uniquement (Caviglia, 2003).

Ces inondations sont liées pour l'essentiel à des causes dont l'origine est locale. L'objet de cette étude n'est donc pas de travailler sur les problèmes liés aux inondations du Rhône et de la Saône, dont les facteurs en cause sont pour une large part externes à l'agglomération, donc exogènes. L'échelle d'analyse est celle d'un risque territorialisé à l'échelle de l'agglomération et de ses marges, dont les facteurs sont principalement locaux, exception faite d'une partie des facteurs climatiques qui sont à l'origine des pluies.

La nécessité pour les gestionnaires et les élus de la communauté urbaine de Lyon de prendre en compte cette dimension aléatoire des précipitations répond donc à une forte demande sociale, car les collectivités locales et territoriales se doivent d'assurer la protection de leurs concitoyens contre les risques liés aux inondations (Goubersville et Laborde, 2005). Cependant, là n'est pas la seule préoccupation des élus, car la lutte contre le risque inondation est prise dans un étau socio-économique dont il est difficile de s'extraire. D'une part, les récents sinistres ont renforcé la demande de sécurité venant de la population, mais de l'autre, la croissance démographique et la demande foncière exercent une forte pression par un besoin de terrains constructibles accru. « Dans un tel contexte, la lutte contre les inondations n'est jamais définitivement acquise » (Vinet, 2004).

La volonté des décideurs de prendre en considération la dimension aléatoire des précipitations est donc forte, car les nuisances qui en découlent peuvent être un frein au développement économique du Grand Lyon. C'est le cas en particulier de l'est lyonnais, qui dispose d'une plaine au relief peu marqué, représentant autant de potentialité en termes d'espace pour le développement de l'urbanisation et conjointement pour l'essor économique de l'agglomération. Dans ce cadre une connaissance fine de l'aléa pluvial est essentielle.

Les préoccupations liées au ruissellement pluvial ne sont pas nouvelles et ont déjà motivé des études sur ce thème. Cependant, les études conduites jusqu'à aujourd'hui sur l'aléa pluvial de l'agglomération sont mal adaptées. Elles sont pour la plupart partielles, notamment à cause d'échelles d'analyse inadaptées et en raison d'un manque de mobilisation d'outils d'analyse performants. Le radar météorologique n'a, par exemple, pas été utilisé. Avant une période très récente sur ce type d'approche, Lyon accusait un certain retard en comparaison à d'autres agglomérations comme celles de Marseille, Paris, Nîmes ou Nancy.

Afin d'y remédier, le Grand Lyon a souhaité développer ces approches dans le cadre de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie Urbaine (OTHU). L'OTHU est un laboratoire de recherche hors murs dont le but est d'améliorer la gestion des flux hydriques, des rejets

urbains et de leurs impacts sur les milieux récepteurs, notamment par temps de pluie, en proposant de nouvelles solutions de conception et de gestion de l'assainissement. Notre recherche et travail de thèse s'inscrit dans cette structure de recherche fédérative qui constitue une réelle opportunité en termes de moyens techniques et d'approche pluridisciplinaire pour la réalisation de nos travaux.

Une grande partie de l'apport de mon travail de thèse a donc pour objectif d'améliorer la connaissance de l'aléa pluvial sur le Grand Lyon, afin de réduire la dimension aléatoire du phénomène. Cette amélioration de la connaissance qui se fonde sur une analyse descriptive, mais aussi dynamique, devait permettre conjointement de déterminer s'il existait un « cas lyonnais » en matière de distribution spatiale des pluies et de dynamique du phénomène, traduisant le poids des facteurs locaux, tels que la topographie, l'îlot de chaleur urbain, etc. Les premières études sur ce sujet ont alerté sur le rôle apparemment faible, voire nul, de ces facteurs (Comby, 1998). Ce travail visait à apporter des éléments permettant de cerner ses hypothèses, voire de les confirmer. Les études devaient encore permettre de déterminer l'existence éventuelle de secteurs plus fréquemment sollicités et plus constamment touchés par les précipitations, à des fins de gestion.

Cette amélioration de la connaissance de la pluie lyonnaise se fonde sur l'utilisation de deux outils spécifiques et complémentaires. Le premier est le réseau de mesure au sol, constitué d'une trentaine de pluviomètres. Cette densité place ce réseau parmi un des plus pourvu en dispositifs de mesure en Europe. Le second outil retenu pour la caractérisation des pluies est le radar météorologique, jamais utilisé jusqu'à présent sur le Grand Lyon. A cet effet, nous avons exploité les données du radar local de Lyon, du réseau Aramis de Météo-France, grâce à une forte collaboration de cette institution. La complémentarité de ces deux outils a permis des avancées notables dans la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais.

Cependant, l'amélioration de la connaissance, nécessaire, de l'aléa pluvial, ne permet pas, à elle seule, une meilleure maîtrise des risques associés. Ces risques se trouvent largement conditionnés et impactés par les caractéristiques du territoire, et se manifestent sur de nombreux enjeux, de natures diverses, *a fortiori* dans cette étude en milieu urbain, qui ne présentent pas la même sensibilité à l'aléa. Il était ainsi nécessaire de prendre en compte la vulnérabilité du territoire concerné. Cette préoccupation a constitué la seconde partie de ce travail.

Les études consacrées à l'analyse de la vulnérabilité urbaine sont plus récentes que celles focalisées sur l'aléa. Sur le territoire d'étude, peu de travaux y ont été consacrés jusqu'alors. À l'instar de ceux qui portent sur l'aléa pluvial, les échelles d'études sont souvent inadaptées. On relevait aussi des approches méthodologiques pouvant être affinées. Le

troisième chapitre de cette thèse porte de ce fait sur l'étude de la vulnérabilité urbaine lyonnaise, et propose une méthodologie qui permet une application concrète à portée opérationnelle, répondant ainsi aux souhaits et à la commande des gestionnaires et des décideurs de la collectivité. Elle vise notamment à déterminer si certains secteurs de l'agglomération sont plus vulnérables que d'autres, et à exposer les raisons de cette disparité. Elle devait aussi fournir des éléments sur l'évolution spatiale de cette vulnérabilité, mais aussi déterminer les types d'enjeux les plus sensibles à la submersion, et ceux dont le maintien de l'intégrité est primordial pour l'agglomération.

Ainsi, l'amélioration conjointe des connaissances qui portent sur l'aléa pluvial lyonnais, mais aussi sur la vulnérabilité urbaine, avait donc comme finalité de répondre aux attentes des gestionnaires de cette collectivité en permettant une meilleure gestion des risques associés sur le territoire du Grand Lyon.

Rappel essentiel sur quelques éléments des concepts du risque

La notion de risque : une notion polysémique

« Peu d'objets empiriques se révèlent aussi riches et multiformes que ce que le sens commun technico-administratif désigne sous le vocable de « risque » » (Coanus et Comby, 2002). D'après les mêmes auteurs, l'objet empirique que constitue la gestion contemporaine des risques, située au carrefour des problématiques de l'aménagement et des sciences humaines et sociales, a fait la preuve de son intérêt, tant scientifique que social. En effet, sur le plan scientifique, la notion de risque « permet de décliner de façon renouvelée un certain nombre de grandes questions familières aux SHS », et sur le plan social, « il répond aux préoccupations de multiples acteurs » (Coanus et Comby, 2005).

En complément, il est nécessaire de distinguer le risque de la catastrophe. « Contrairement à la catastrophe, le risque relève du probable mais reste non réalisé » (Veyret et Reghezza, 2005). Pour Dauphiné (2003), « le risque relève du probable et non pas de la certitude. Celui-ci n'est jamais définitif et son appréciation varie dans le temps ». Les paragraphes suivants vont donc fournir des éléments synthétiques permettant de comprendre ce concept de risque, lui-même fondé sur des notions d'aléa, de vulnérabilité et d'enjeu.

« Notion polysémique » (Coanus et Comby, 2008), le risque naturel est le plus souvent perçu comme le produit des interactions entre une société et son environnement sur un espace donné, et est « inhérent au système territorial » (Meschimet de Richemond et Reghezza, 2010). Il s'agit d'une « notion composite, […] considéré comme la concrétisation potentielle de phénomènes plus ou moins prévisibles et ayant des répercussions le plus souvent négatives dans l'espace et le temps » (Demoraes et D'Ercole, 2009). Il serait ainsi le « résultat de la rencontre entre un élément perturbateur de nature aléatoire et un élément vulnérable » (Chocat, 1997a), ou encore « la probabilité de perte affectant des objets (les enjeux) soumis à un événement dommageable (l'aléa) » (Veyret et Reghezza, 2005).

Ainsi, « l'approche traditionnelle du risque naturel repose sur la distinction entre deux composantes du risque, l'aléa, qui désigne le processus physique source de danger, et la vulnérabilité, qui renvoie à la propension de l'enjeu à subir un endommagement » (Meschimet de Richemond et Reghezza, 2010).

Il existe de ce fait un relatif consensus, notamment dans les sciences de la nature et de la terre et dans les sciences pour l'ingénieur, selon lequel la notion de risque se définit par le croisement de ces deux composantes : d'un côté l'aléa, et de l'autre la vulnérabilité, fortement liée à la notion d'enjeu. « Le couple aléa / vulnérabilité est la clé de gestion de tous les risques » (Bourrelier, 2006). Pour F. Léone (2007), « il est désormais admis que le risque naît de la conjonction d'une menace (l'aléa) et d'enjeux plus ou moins vulnérables ».

Cette notion générale s'applique à tous les types de risques, et particulièrement ici à celui d'inondation. En conséquence, pour B. Barroca et G. Hubert (2008), « le risque inondation n'existe que lorsqu'un aléa hydrologique s'applique sur un territoire vulnérable, c'est-à-dire un territoire comportant des enjeux qui peuvent être altérés par une inondation. L'aléa représente la composante hydraulique du risque, la vulnérabilité étant quant à elle la sensibilité des enjeux soumis à l'aléa ». D'après C. Dimitrov et X. Pin (2006), « l'inondation peut constituer un aléa majeur qui ne devient un risque majeur que dans la mesure où des enjeux importants y sont exposés. Les conséquences d'un risque majeur sur les enjeux exposés se mesurent en termes de vulnérabilité ».

Les définitions sur le sujet sont nombreuses et l'objet n'est pas ici d'en établir une liste qui viserait à l'exhaustivité, mais nous retrouvons dans ces définitions les constituants du risque inondation que sont l'aléa et la vulnérabilité des enjeux. Cette définition du risque, constituée autour de la relation portant sur le binôme « aléa » et « vulnérabilité », semble faire l'unanimité dans la littérature relative à cette thématique, et dans la communauté scientifique, aussi bien dans le monde de la recherche que chez les acteurs opérationnels.

Cependant, « chaque terme revêt suivant le champ concerné, de multiples définitions, parfois se recoupant entre elles, parfois distinctes suivant les auteurs » (Haziza, 2007). Pour T. Coanus et J. Comby (2002), « cette difficulté procède à notre sens de la pluralité des objets auxquels renvoie le terme même de « risque », pluralité qui conduit à évoquer sous le même vocable des objets distincts. A ce titre, trois postures principales ont pu être identifiées pour l'approche des risques » : objectiviste (ou encore naturaliste), culturaliste et constructiviste (Coanus, 2010).

En outre, pour certains chercheurs des sciences humaines et sociales, la définition du risque, fondée sur le binôme aléa et vulnérabilité, est d'une portée essentiellement pratique. Elle recèle de nombreux inconvénients, et est même parfois « d'une pauvreté affligeante » (Liégeois, 2007). En effet, « elle est tout d'abord critiquée par de nombreux acteurs de terrain, qui, s'ils lui reconnaissent une certaine valeur dans une logique de diagnostic, constatent son incapacité à prendre en compte une dimension temporelle, plus adaptée à une logique de gestion de l'espace dans la durée. Par ailleurs, l'apparente simplicité numérique de la définition masque les difficultés à quantifier effectivement les deux paramètres […]. Il semble donc nécessaire de ne pas conférer à une telle définition une place hégémonique » (Coanus et Comby, 2002).

L'aléa : la notion longtemps uniquement prise en compte dans le risque

« Longtemps naturaliste, la géographie française s'est d'abord consacrée à l'analyse de l'aléa avant de s'ancrer dans les sciences sociales » (Veyret et Reghezza, 2005). Ainsi, la gestion du risque a longtemps été focalisée sur la maîtrise de l'aléa. Pour J.-E. Paturel et B. Chocat (1993), « le risque est abordé en hydrologie urbaine par le biais de l'étude de l'événement perturbateur, le phénomène pluvieux ». En effet, depuis trois siècles et plus particulièrement depuis quelques dizaines d'années, la connaissance de l'aléa a fait « des progrès considérables: les phénomènes sont identifiés, mesurés, modélisés, recadrés historiquement, actualisés, cartographiés » (Bourrelier, 2006). De ce fait, « jusqu'à la fin des années 1980, les cartes dites de risque « naturel » ne comportaient le plus souvent qu'un fond topographique sur lequel étaient superposées les zones exposées à tel ou tel type de phénomènes (inondation, glissement de terrain, couloir d'avalanche, etc.) » (Demoraes et D'Ercole, 2009), c'est-à-dire un simple zonage de l'aléa.

Dans son sens général, "l'aléa exprime la mesure d'une probabilité de situation, d'un événement ou d'une cause quelconque. Il suggère dans le domaine des risques naturels la

représentation du danger en prenant un rôle actif, matérialisé par ses caractéristiques spatio-temporelles et son intensité » (Haziza, 2007). L'aléa est ainsi perçu comme un événement menaçant pouvant occasionner des dommages, caractérisé par une intensité au cours d'une période donnée et sur une étendue donnée, et par une probabilité d'occurrence. C. Griot et P.-A. Ayral (2001) le voient comme « une possibilité d'apparition d'un phénomène résultant de facteurs ou de processus qui échappent au moins en partie à l'homme ». Pour E. Propeck-Zimmermann et al. (2009), « l'aléa est entendu comme la probabilité d'occurrence d'un événement pouvant entraîner des effets dommageables dans une aire donnée ».

Les premiers chapitres de ce travail vont donc porter sur la caractérisation de l'aléa pluvial du Grand Lyon, dans le but de mieux comprendre le risque associé. Cependant, « l'évolution actuelle des pratiques et des réglementations conduit à attacher de plus en plus d'importance à la vulnérabilité [des enjeux et] des milieux exposés à la perturbation » (Chocat, 1997a). En outre, d'après C. Gilbert (2006), "l'aléa ne serait que l'occasion de l'expression des vulnérabilités".

La vulnérabilité : une prise de conscience récente et nécessaire

Contrairement à l'aléa, le terme de vulnérabilité ne fait son apparition que très tardivement dans les études scientifiques (Ruin et Lutoff, 2004). Il se substitue à « des appellations aussi diverses que sensibilité, susceptibilité, fragilité » (Veyret et Reghezza, 2005). E. Haziza (2007) la voit comme la « réponse territoriale à l'aléa ». Elle est perçue par C. Griot et P.-A. Ayral (2001) comme « un indice de fragilité des éléments à risque par rapport à l'occurrence d'un événement », de même que par Y. Veyret et M. Reghezza (2005) comme « le degré d'endommagement dû à l'exposition des enjeux ». Pour R. D'Ercole et P. Pigeon (2005), elle est « la propension d'une société donnée à subir des dommages, en cas de manifestation d'un phénomène naturel ou anthropique ». Cette définition est très proche de celle de E. Propeck-Zimmermann et al. (2009) pour lesquels « la vulnérabilité exprime la propension des enjeux à subir des dommages ».

La relation entre un aléa et la vulnérabilité des enjeux crée ainsi la notion de risque. Cependant, la relation existante entre les deux termes de ce binôme est ambiguë. En effet, pour B. Chocat (1997a), « la vulnérabilité est totalement indépendante de l'aléa », mais elle se manifeste cependant lors de l'occurrence de ce dernier. Cette notion est partagée par la plupart des auteurs (Gilbert, 2003 ; Reghezza, 2009 ; Salagnac, 2006 ; Bouchon, 2006 ; Astrade et al., 2007, par exemple), dont notamment Y. Veyret et M. Reghezza (2005) pour

lesquelles « la vulnérabilité est […] une propriété intrinsèque d'une société, d'un groupe social, d'un individu, un facteur interne du risque, quasi indépendante de l'aléa au sens où elle préexiste à ce dernier ; mais qui est cependant révélée par lui ».

Du nombre élevé de définitions présentes dans la littérature scientifique et propres à chaque auteur, il ressort du concept de vulnérabilité son caractère polysémique. De ce fait, « la caractérisation de la vulnérabilité s'avère ainsi être très souvent un exercice extrêmement délicat » (Haziza, 2007). Cependant, une gestion efficace des risques sur un territoire nécessite d'évaluer de façon intégrée les conjonctions des différents paramètres d'aléas mais aussi de vulnérabilités (Reghezza, 2009 ; Chardon, 1994 ; Manche, 1997 et 2000). Ainsi, l'étude de la caractérisation de la vulnérabilité des enjeux du Grand Lyon fait l'objet de la dernière partie de ce travail.

Des enjeux vulnérables à l'inondation

Dans la littérature relative à la notion de risque, le terme « enjeu » est aussi très fréquemment rencontré. Il est même devenu quasiment indissociable de la notion de vulnérabilité. Les enjeux constituent l'ensemble des personnes et des biens directement menacés par l'aléa, qui sont susceptibles de subir des préjudices ou des dommages (Griot et Ayral, 2001). Pour E. Propeck-Zimmermann et al. (2009), « l'enjeu définit tout ce qui peut subir des dommages ou dysfonctionnements et fait référence à la composition et au fonctionnement global du territoire (population, bâti, milieu naturel, transport…) ». Enfin, pour F. Demoraes et R. D'Ercole (2009), ils constituent « par définition des éléments essentiels au fonctionnement et au développement d'un territoire. Leur endommagement, défaillance ou perte seraient en conséquence particulièrement préjudiciable pour le territoire en question ».

Les enjeux peuvent être de diverses natures, et les qualificatifs diffèrent selon les auteurs et les études. Ainsi, les enjeux peuvent être humains, environnementaux, matériels, patrimoniaux, économiques, fonctionnels, territoriaux, politiques, etc. (Thouret et Léone, 2003 ; del Carmen Llasat, 2004 ; Lutoff, 2000 ; Godfroid, 2004 ; Vinet, 2004 notamment). Ces enjeux peuvent être affectés par différents types d'endommagement, dont la liste ne fait que croître au fur et à mesure des études sur le sujet. Ainsi, les endommagements des enjeux par une inondation et ses différentes formes peuvent être de nature fonctionnelle, structurelle, économique, psychologique, etc. (par exemple Vinet, 2004 ; Veyret et Reghezza, 2005 ; Carré ; 2006 ; Rufat, 2008 ; Reghezza, 2006 ; Griot, 2007a et 2007b).

Les différentes formes d'inondation

Le nombre de communes concernées par des phénomènes d'inondation varie en fonction des études (Dimitrov et Pin, 2006), et se situerait entre 10000 et 16000, soit un tiers environ, sur 76 départements et 3,5 % du territoire métropolitain. « Trois cents agglomérations importantes sont concernées, et ces chiffres sont en permanente augmentation » (Chocat, 1997b).

D'une manière générale, les inondations sont souvent le résultat de crues. Il existe cependant d'autres causes, plus rares, comme la rupture de barrage ou la survenance d'un tsunami, ou encore la remontée d'une nappe alluviale (souvent concomitante à une crue cependant). Il est classiquement reconnu trois principaux types d'inondation.

- *La crue fluviale (ou crue de plaine)*

Ce type de crue affecte des cours d'eau principaux, alimentés par des bassins versants de vaste envergure sur lesquels des précipitations abondantes et de longues durées se sont abattues. Dans ce genre de crue qui se prolonge parfois sur plusieurs jours après l'arrêt de la pluie, la montée des eaux est lente, ce qui permet généralement d'évacuer les personnes exposées et de mettre en place un dispositif de gestion de l'inondation (Chocat, 1997a).

- *La crue torrentielle (ou crue rapide, crue subite ou crue éclair)*

Ce type de crue est susceptible de survenir en tout point du réseau hydrographique. Causées par des pluies présentant de fortes intensités et pouvant ne concerner qu'une petite partie du bassin versant, elles sont caractérisées par leur nature soudaine et brutale aux conséquences dommageables. La montée de l'eau est très brusque, ce qui rend l'alerte des riverains très ardue (Chocat, 1997a ; Calvet et Lemartinel, 2002 ; Glass, 2004 ; Deshons, 2002 ; Haziza, 2008).

- *La crue par ruissellement pluvial urbain (ou crue urbaine)*

Cette crue est spécifique au milieu urbain (d'où elle tire une de ses appellations), et découle de l'insuffisance des systèmes artificiels d'évacuation des eaux pluviales d'une agglomération. Elle présente des analogies avec la crue torrentielle, notamment en ce qui concerne la rapidité de la montée des eaux (Andrieu et al., 2004). « Provoquée par les seules précipitations tombant sur l'agglomération et/ou sur les bassins versants périphériques ou ruraux de faible taille » (Chocat, 1997a) et « l'imperméabilisation des sols par les constructions, voiries, surfaces de stationnement, etc., qui limite l'infiltration des eaux

de pluie avec pour conséquence une saturation du réseau d'assainissement pluvial et des écoulements intenses et rapides dans le réseau de voirie » (Dimitrov et Pin, 2006).

Ce travail de recherche, par son cadre d'application à la communauté urbaine de Lyon, va spécifiquement s'intéresser à ce dernier type d'inondation. Les deux premiers chapitres de la thèse seront donc consacrés à la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais, avant de s'intéresser aux relations entre les pluies et les nuisances occasionnées, pour déboucher sur une réflexion portant sur la nécessité d'une évaluation fine de la vulnérabilité territoriale.

Choix de la zone d'étude et contexte administratif

Un cadre géographique d'étude conditionné par le contexte administratif

Ce doctorat a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (CIFRE) entre le Laboratoire Climatologie Risque Environnement du Centre de Recherche en Géographie et Aménagement, UMR 5600 CNRS Environnement Ville Société, et le Service Etudes de la Direction de l'Eau de la communauté urbaine de Lyon. Les résultats de ce travail comportent donc un caractère opérationnel directement exploitable par les gestionnaires du Grand Lyon.

Cette communauté urbaine a été créée le 31 décembre 1966 sous l'impulsion de l'État par décret. Aussi désignée par le terme « Grand Lyon », elle se situe au nord du couloir Rhodanien, à la confluence du Rhône et de la Saône (fig. 1.1). Elle présente une forte concentration urbaine car elle regroupe à ce jour 57 communes sur une superficie de 515 km² (fig. 1.2). Fort de 1 300 000 habitants, ce territoire est donc pourvu d'une densité moyenne supérieure à 2500 habitants au kilomètre carré. L'agglomération concentre ainsi 80% de la population du Rhône sur seulement 16% de sa superficie (www.grandlyon.com).

L'objectif de cette collectivité territoriale est de remédier au décalage entre les structures administratives et la réalité géographique des agglomérations, de gérer les services publics de façon solidaire et rationnelle et de penser le développement urbain en

termes d'agglomération. La communauté urbaine de Lyon exerce un grand nombre de compétences, déclinables selon trois thèmes majeurs. Les actions les plus visibles du Grand Lyon se situent dans les services au quotidien, comme l'approvisionnement et la distribution de l'eau potable, l'assainissement, la collecte et le traitement des ordures ménagères, le nettoyage des voiries ou encore la gestion des déplacements et le stationnement. Cependant, la communauté joue aussi un rôle important dans l'urbanisme et l'habitat. En effet, celle-ci est chargée entre autres de la planification et de l'élaboration des documents d'urbanisme, de la création ou de la rénovation de zones d'habitat ou d'activités, ou encore des grands équipements d'agglomération. Enfin, le Grand Lyon participe au développement économique de l'agglomération avec notamment l'accompagnement du tissu économique local dans ses évolutions et mutations, l'implantation d'entreprises nouvelles et le soutien aux pôles de compétitivité.

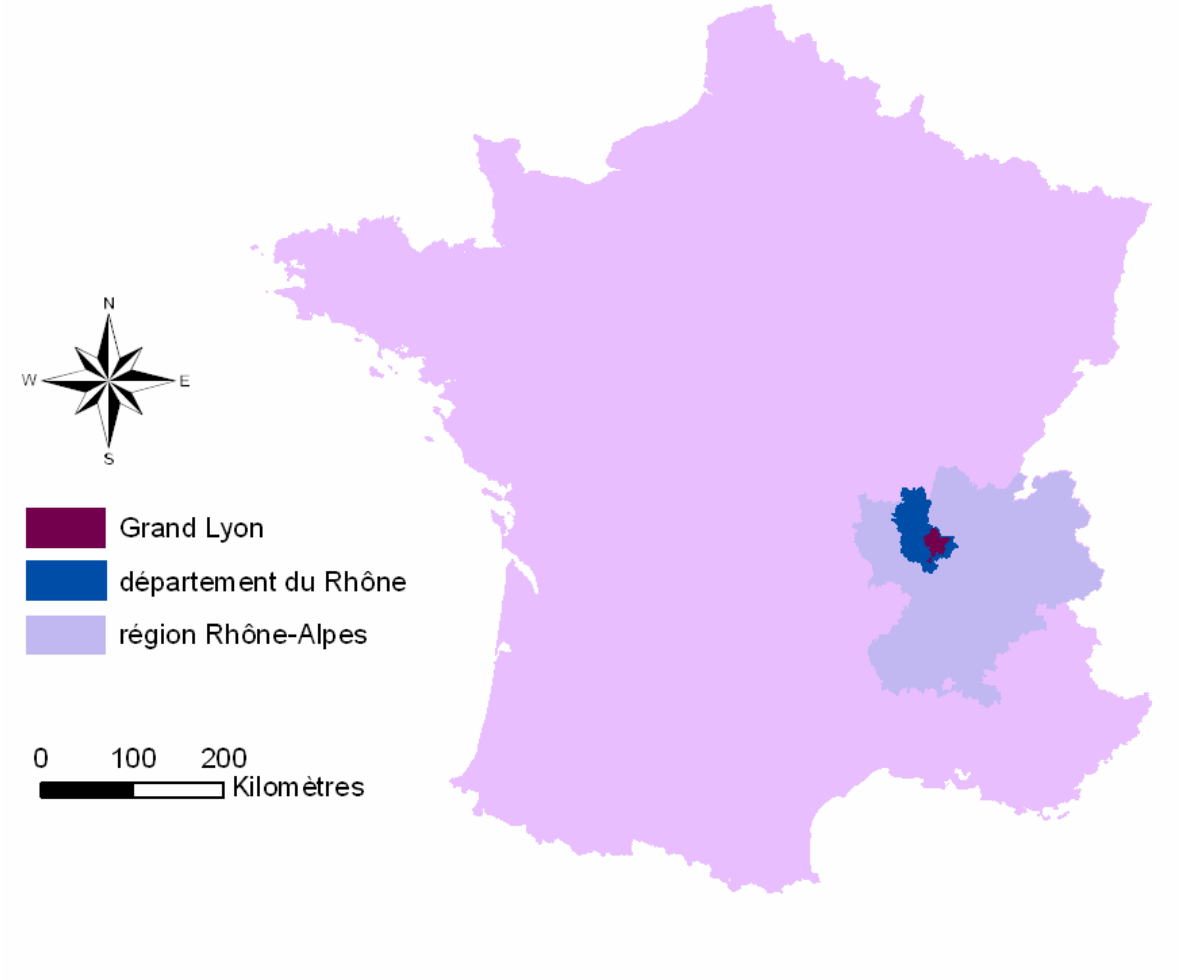


Figure 1.1 : Localisation de la communauté urbaine de Lyon en France

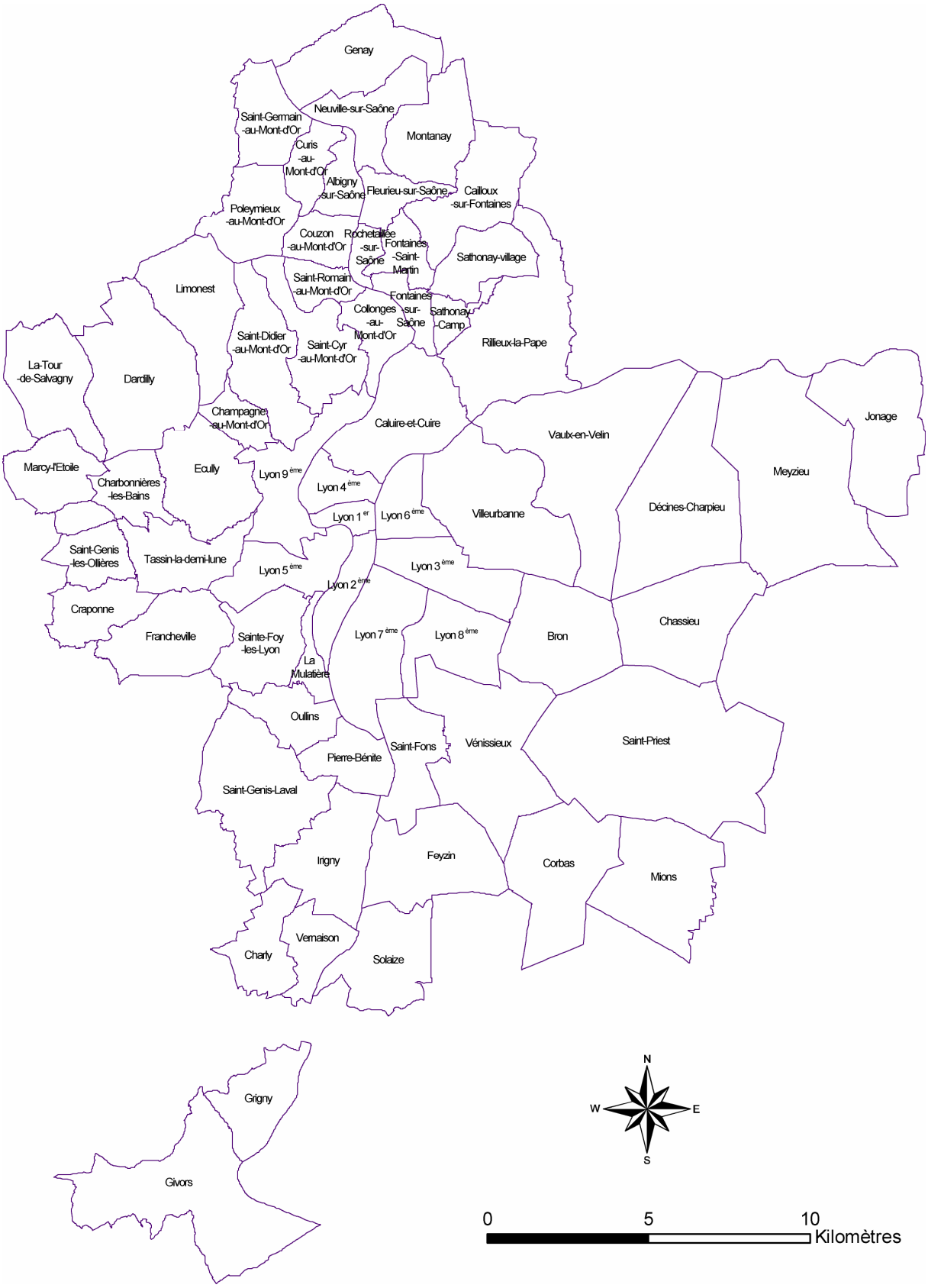


Figure 1.2 : Communes du Grand Lyon

À l'origine, le Grand Lyon était conçu comme une communauté de moyens pour permettre de mutualiser les compétences et de réaliser des équipements nécessaires à tous mais trop coûteux pour chacun. Il constitue aujourd'hui une communauté de projets autonome, enrichie de nouveaux objectifs et de nouvelles compétences, comme la prospection et la valorisation économique, les perspectives urbaines définies et mutualisées avec les différentes échelles territoriales, ou encore des actions inscrites systématiquement dans une politique volontaire de développement durable (www.grandlyon.com).

Le contexte administratif de ce doctorat, lié à la convention CIFRE avec le Service études de la Direction de l'eau du Grand Lyon (fig. 1.3), a ainsi posé naturellement le cadre géographique principal de l'étude, qui sera donc les limites de la communauté urbaine. Cependant, cette étude a débuté en 2005. À cette date, les communes de Givors et de Grigny, au sud de l'agglomération, ne faisaient pas encore partie de la communauté urbaine. Elles ont en effet intégré officiellement le Grand Lyon le 1er janvier 2008. Ainsi, les limites de la communauté urbaine utilisées ici seront celles antérieures à 2008. En complément, il peut être noté que la commune de Lissieux, au nord-ouest de l'agglomération, intégrera la communauté le 1er janvier 2011.

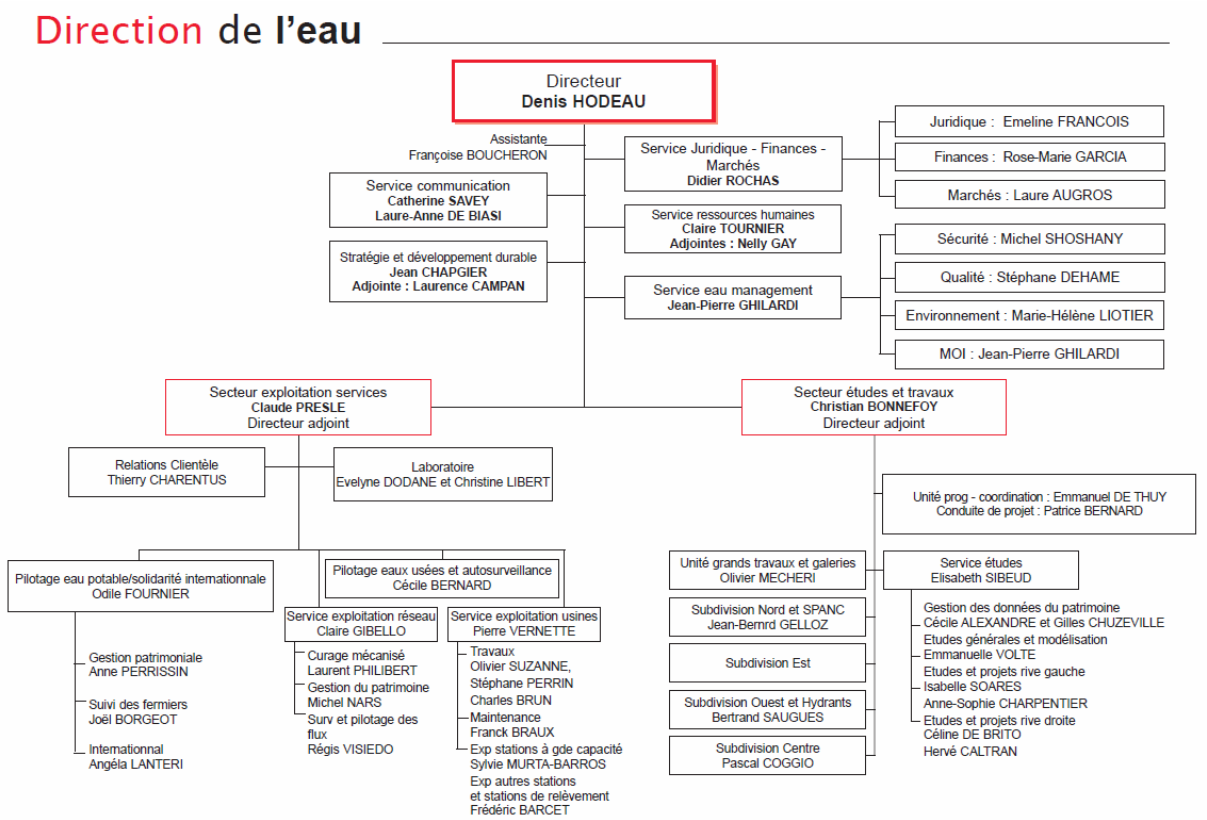


Figure 1.3 : Organigramme de la Direction de l'eau du Grand Lyon

Une topographie qui influence le réseau hydrographique

Une subdivision topographique en trois ensembles distincts

Selon G. Mottet (1997), la situation géographique de Lyon, au nord du couloir Rhodanien, explique en partie l'organisation et la structure des reliefs de l'agglomération lyonnaise. Le site naturel de l'agglomération lyonnaise se subdivise ainsi en trois secteurs.

A l'ouest, on trouve la bordure orientale du Massif Central et sa retombée faillée sur le fossé du Rhône. Le socle imperméable et très résistant est recouvert de façon non homogène de sédiments plus ou moins perméables (fig. 1.4). Au nord-est, situé entre le Rhône et la Saône, le plateau des Dombes est issu des glaciations quaternaires descendues des Alpes en lobes successifs. Ce plateau est constitué de moraines, d'argiles et d'alluvions fluvio-glaciaires. A l'est se trouve une large plaine, héritée de la terminaison occidentale du lobe glaciaire Würmien. Les nombreux remaniements des eaux de fonte sont à l'origine de sa platitude. Les buttes (ou Balmes) y alternent avec de larges couloirs peu encaissés résultant de lobes glaciaires.

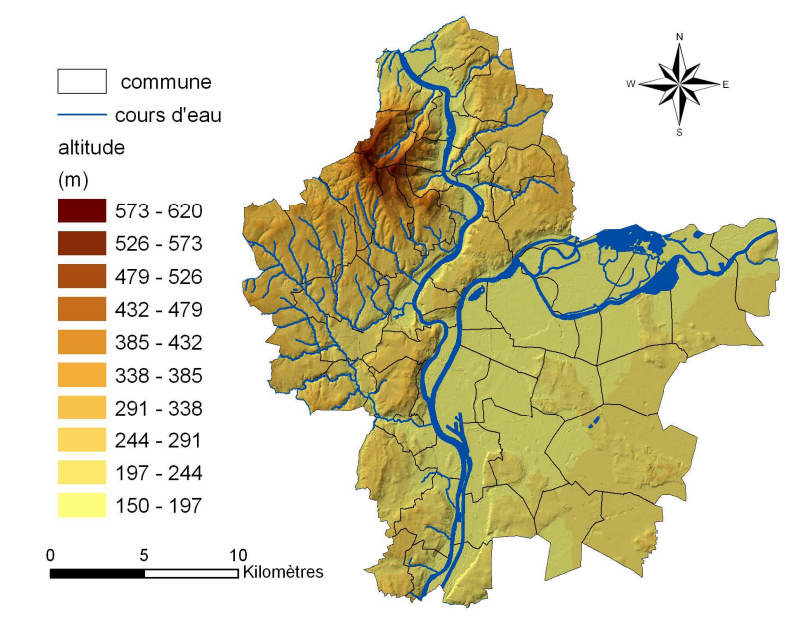


Figure 1.4 : Topographie et réseau hydrographique du Grand Lyon

Un réseau hydrologique contrasté

Cette subdivision structurelle et géologique influence la nature du réseau hydrologique, et la constitution des différents bassins versants (Mottet, 1997). La prise en considération du réseau hydrologique et des bassins versants oppose indéniablement l'ouest et en partie le nord du Grand Lyon avec les Monts d'Or, à la plaine de l'est lyonnais, en rive gauche du Rhône. Ainsi, nous obtenons une division nette marquée par ce fleuve. L'ouest et le nord de l'agglomération sont pourvus d'un réseau hydrographique dense, avec bon nombre de ruisseaux. Certains comme l'Yzeron ou le Ravin présentent même des caractères torrentiels en cas de fortes précipitations. À l'opposé, la plaine de l'est est dépourvue de réseau hydrographique, si ce n'est le Rhône dans sa partie la plus septentrionale.

Cette subdivision souligne que les risques liés à l'aléa pluvial, et en particulier les inondations ne sont pas partout de la même forme sur l'agglomération lyonnaise. L'est lyonnais, plat, est plus touché par un risque lié au ruissellement, alors que l'ouest lyonnais, plus pentu, avec notamment le bassin versant de l'Yzeron, est victime de problème de nature torrentielle. Il existe donc une opposition ouest-est en termes de risque sur l'agglomération lyonnaise, liée à la topographie. Cependant, cette échelle d'analyse locale ne peut suffire à la caractérisation de l'aléa pluvial, d'autant que la compréhension du phénomène nécessite une approche qui déborde largement ce cadre.

La nécessité de recourir à un territoire plus vaste

Les limites précises d'un cadre géographique de recherche en climatologie urbaine sont une question majeure, même quand la problématique retenue est l'étude de l'aléa pluvial sur le Grand Lyon. En effet, l'explication des mécanismes du temps et des situations pluviogènes imposent d'envisager toutes les échelles d'espace (Comby, 1998). « Nombre de composantes atmosphériques des événements climatiques extrêmes sont souvent inscrites en d'autres lieux dans l'atmosphère que sur le site d'un paroxysme, plusieurs jours avant qu'il ne se manifeste. En cela, même si l'on réduit le cadre géographique des recherches au paramètre défini par des « risques territorialisés », l'échelle des causes, notamment climatiques, n'est pas réductible à ce territoire » (Comby, 2004a).

Ainsi, pour l'analyse de la distribution des pluies sur le Grand Lyon, la définition du périmètre de l'aléa est nécessairement à deux niveaux : celui des causes (qui comprend souvent toutes les échelles), et celui de la manifestation des causes, plus localisées, et ici

réduite à l'agglomération lyonnaise. Il est donc nécessaire d'élargir le cadre géographique de l'étude pour prendre en compte l'ensemble des facteurs à l'origine des précipitations, sans négliger pour autant le territoire urbain du Grand Lyon.

Il en est de même pour l'échelle d'étude temporelle. Ainsi cette étude a été conduite à diverses échelles temporelles :

- *diachronique : depuis que des mesures pluviométriques fiables existent en grand nombre sur l'agglomération lyonnaise (1988) pour l'étude de la variabilité temporelle de cet aléa*
- *synchronique : pour l'analyse des hauteurs d'eau précipitées et des débordements associés*
- *événementielle : pour l'étude fine des épisodes pluvieux remarquables de l'agglomération*

Résultats des études antérieures : un apport réel mais une connaissance de la pluie encore partielle

Plusieurs études portant sur l'analyse de la pluviosité sur le Grand Lyon ont été réalisées, principalement au cours des quinze dernières années, au Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIE) de l'INSA de Lyon, au Cemagref de Lyon, ou au Laboratoire Climatologie Risque Environnement de l'Université Jean Moulin Lyon III. Dans ces études, les précipitations sont abordées sous deux angles complémentaires. Certaines traitent de l'évolution dans le temps des pluies alors que d'autres se focalisent plus sur la répartition spatiale des précipitations. Si l'apport des travaux effectués est réel, il n'est pas suffisant pour une caractérisation fine de l'aléa pluvial sur l'agglomération pour deux raisons essentielles. La première est que les travaux effectués sont rares, et la deuxième raison est que les échelles d'analyse considérées sont mal adaptées à la problématique.

Des échelles d'études inadaptées à la problématique de la thèse

Analyse des situations pluviogènes

Si la thèse de J. Comby (1998) sur les paroxysmes pluviométriques dans le couloir Rhodanien est dédiée à l'analyse du risque pluvial, l'échelle du phénomène considéré est volontairement limitée à celle des grands systèmes organisés. Elle accorde donc une place réduite aux épiphénomènes d'origine locale. En outre, la recherche est consacrée à l'ensemble de la vallée du Rhône, avec un accent particulier sur le sud, et n'est donc pas focalisée sur l'agglomération lyonnaise. Elle souligne cependant un doute fort sur l'importance des facteurs locaux (entre autres).

Les travaux de S. Rueneuve (Rueneuve, 2001 ; Comby et Rueneuve, 2004) qui, au contraire, étaient centrés sur l'agglomération, considère la même échelle d'analyse des phénomènes, soit celle synoptique des situations et météorotypes à risque. Seuls les travaux (1994) et la thèse de I. Béral-Guyonnet sur le climat urbain et la pollution atmosphérique de l'agglomération lyonnaise (1997) sont centrés pour une large part sur des facteurs climatiques locaux. Cependant, ces travaux traitent très peu des pluies, mais des problèmes liés à la pollution urbaine.

Météo-France s'est consacrée pour sa part à l'analyse des systèmes convectifs de méso-échelle, ainsi qu'à l'étude d'épisodes historiques remarquables (Deblaère et Fabry, 1998). Là encore, les échelles considérées restent larges, en considérant au mieux l'échelle départementale, aucune des études ne se focalisent réellement sur l'agglomération urbaine lyonnaise.

Analyse de la répartition spatio-temporelle des pluies : des pas de temps trop longs

D'une manière générale, les études antérieures réalisées sur la répartition spatio-temporelle des pluies utilisent des pas de temps longs, journaliers dans les meilleurs des cas (Comby, 1998), souvent mensuels (Lecourieux, 1999), voire parfois annuels. Cela n'est pas suffisant si l'on souhaite tendre à une caractérisation fine de la pluviosité. En effet, il est

nécessaire de travailler sur des pas de temps beaucoup plus faibles, de l'ordre de la dizaine de minutes, ou de la minute, afin de distinguer tous les événements pluvieux survenant dans une même journée.

S. Rueneuve, dans son travail consacré aux météorotypes (2001), utilise des pas de temps courts, mais nous avons vu que l'échelle d'analyse des phénomènes considérés ne cadrait pas avec notre problématique. Seule C. Druot, en 2003, a utilisé des pas de temps courts, pour l'essentiel en six minutes, vingt minutes et une heure, afin d'étudier la répartition spatio-temporelle des pluies. Mais son travail s'est limité à l'étude de dix cas d'espèces en lien avec des phénomènes pluvieux majeurs, correspondant à des nuisances fortes. Enfin, dans sa thèse, J.-E. Paturel (1991) a travaillé à des échelles fines de pas de temps courts. Cependant, la recherche porte seulement sur cinq ans d'analyse, série trop courte pour être représentative de la réalité du phénomène, autre inconvénient majeur des études antérieures.

Des séries de données courtes

Les séries de données utilisées dans les études antérieures révèlent un autre inconvénient de taille. En général, les séries de données utilisées sont trop courtes pour être représentatives du phénomène étudié. En effet, nous avons vu que J.-E. Paturel (1991) n'avait utilisé que cinq ans d'étude pour la réalisation de sa thèse. O. Lecourieux (1999) et C. Druot (2003) ont utilisé les plus longues séries de données car ils ont exploité dix années, mais cela reste insuffisant quant à la représentativité du phénomène. C'est pourquoi nous utilisons dans ce travail 18 années de données, qui consiste en la plus longue série disponible sur les pluviomètres du Grand Lyon (au commencement de ce doctorat).

Un radar météorologique inexploité

L'agglomération lyonnaise dispose d'un radar météorologique dans son secteur depuis le début des années 90. Ce radar fait partie du réseau *Aramis* (Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique) de Météo-France. Le radar météorologique est un outil de mesure de la pluie essentiel qui dispose d'atouts considérables qui seront exposés par la suite (Champeaux et al., 2009). Or, d'une manière relativement surprenante, cet outil n'a pour le moment jamais été utilisé dans une étude visant à améliorer la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais. En parallèle de l'exploitation du réseau de mesure au sol, l'utilisation du radar météorologique local constitue donc un des objectifs de cette thèse.

Des moyens technologiques limités

Enfin, l'innovation technologique joue aussi un rôle essentiel dans les limites des études antérieures. En effet, la puissance des ordinateurs en 2010 n'est pas la même que dans les années 80 ou 90 (Khelil, 1985 ; Paturel, 1991 ; Nziou, 1994 et Lecourieux, 1999, par exemple). Celle-ci s'est vue décuplée ces dernières années. Cela permet ainsi de pousser maintenant beaucoup plus loin les études. Il en est de même concernant les outils et les logiciels. L'avènement des systèmes d'information géographique (SIG) performants est somme toute assez récent, le passage en quelques années de la version 3.1 d'ArcMap à la version 9.3 d'ArcGis (utilisé ici) du SIG d'ESRI en est un exemple significatif, ce qui permet une forte amélioration des possibilités d'études.

Synthèse et apport des études antérieures sur la répartition spatio-temporelle des précipitations lyonnaises

A l'échelle de la région lyonnaise, I. Béral-Guyonnet en 1994 a établi une carte où sont reportées les moyennes des précipitations annuelles de 1961 à 1994. L'auteur a tracé des isohyètes en utilisant une méthode d'interpolation non précisée. Il semble que l'on puisse déceler une sorte d'axe de symétrie, de direction générale nord-sud, dans lequel on relève 650 mm par an, qui sépare deux gradients de même direction longitudinale, mais de sens opposé. Cet axe se positionnerait, au sud de Condrieu, dans la vallée du Rhône, puis à l'ouest de l'agglomération lyonnaise, et enfin, plus au nord, à l'est de la Saône.

A l'échelle du Grand Lyon, on semble distinguer une zone à l'est de la presqu'île où les hauteurs d'eau sont plus importantes qu'à l'ouest. Ces résultats concordent avec ceux de J.-E. Paturel (1991), lors de son étude sur la période 1986-1988.

D'après O. Lecourieux (1999), une évolution des précipitations apparaît aussi à l'est comme à l'ouest. « La vallée du Rhône est relativement moins pluvieuse que les rebords est et ouest, cet axe de faibles précipitations se retrouve à l'échelle du Grand Lyon ». En effet, de 1989 à 1998, la distribution spatiale des hauteurs de précipitations annuelles présente une hétérogénéité importante. La zone où se situent les moyennes annuelles les plus faibles est au sud-ouest du Grand Lyon, avec moins de 750 mm. Celle où la hauteur est la plus

importante s'étend vers l'est suivant un gradient centre – périphérie, où elle atteint plus de 850 mm.

En 1991, J.-E. Paturel apporte des renseignements sur la dynamique des événements pluvieux. Il utilise une approche fondée sur l'analyse descriptive de la distribution des lames d'eau au cours des épisodes. Il les classe ainsi en deux types. Il y a ceux qui arrivent du sud et se sépareraient en deux pour suivre soit la vallée du Rhône, soit celle de la Saône ; et ceux qui arriveraient de l'ouest et qui traversent le Grand Lyon en suivant une direction ouest–est. En outre, il serait possible selon lui de dégager des zones géographiques où les phénomènes pluvieux seraient les plus intenses, comme sur les reliefs. Cependant, S. Rueneuve (2001) doute de cette division des trajectoires sur le Grand Lyon, le relief n'étant, d'après elle, pas assez « important », ce qui reprend les travaux de J. Comby (1998) qui mettent en lumière la part faible, voire inexistante des facteurs locaux.

En résumé, les études qui portent d'une manière fine sur la caractérisation spatiale et temporelle de l'aléa pluvial lyonnais au commencement de ce doctorat ne sont donc pas nombreuses, et comportent de limites dont il est nécessaire de tenir compte dans l'appréciation des conclusions, aussi bien sur les résultats de la pluviométrie à l'échelle annuelle que sur l'analyse événementielle de la dynamique des épisodes pluvieux. Enfin, il ressort notamment de cette synthèse sur les études antérieures, sur la répartition spatio-temporelle des précipitations sur le Grand Lyon, une absence d'analyse comparative des méthodes d'interpolation spatiale. Cette lacune est comblée dans le cadre de ce doctorat et constitue la prochaine partie de cette thèse.

Objectifs, partenariats et structuration de la thèse

L'amélioration de la connaissance de l'aléa pluvial sur le Grand Lyon est donc une nécessité et une demande forte de la part des gestionnaires de la communauté urbaine. Les attentes au niveau de l'évaluation de la vulnérabilité urbaine sont tout aussi prononcées et indispensables, dans l'optique d'une gestion globale du risque d'inondation sur la communauté urbaine de Lyon.

Ce doctorat, mené par le biais d'une convention Cifre, fait partie d'un ensemble de moyens mis en œuvre dans le cadre d'une démarche globale en hydrologie urbaine. Il s'inscrit ainsi dans les travaux effectués au sein de l'Observatoire de Terrain en Hydrologie

Urbaine (OTHU). L'OTHU est une fédération de recherche qui regroupe treize laboratoires de recherche appartenant à huit établissements lyonnais (le BRGM, le Cemagref, l'Ecole Centrale de Lyon, l'ENTPE, l'INSA et les universités Lyon 1, Lyon 2 et Lyon 3). Ces laboratoires ont fondé une fédération d'équipes de recherche qui a fait l'objet d'une convention inter établissements[1].

Sept thématiques de recherche principales sont rattachées au programme général, dont un en particulier est l'objet de ce travail. Il s'agit du thème « amélioration des connaissances et développement d'outils et méthodes en matières de pluviométrie et de climatologie à l'échelle de l'agglomération, et facteurs de risques associés aux inondations et aux pollutions ». Les retombées scientifiques de l'OTHU doivent porter sur l'analyse, la compréhension et la maîtrise des interactions entre le système urbain et le système eau, qui constituent un enjeu scientifique majeur en matière de développement urbain durable.

Cet observatoire « hors les murs » se matérialise tout d'abord par une forte concentration d'équipements en appareils de mesure installés à la fois sur l'ensemble de l'agglomération lyonnaise, comme le réseau de mesure pluviométrique au sol, et de manière encore plus dense sur des sites d'observation spécifiques expérimentaux (avec notamment des mesures de débit, de pH, de température, de conductivité, de turbidité, etc.).

Le programme de l'OTHU offre donc un cadre remarquable pour le développement de ces recherches en pluviométrie urbaine, car il met à disposition un terrain d'expérimentation exceptionnel au cœur du Grand Lyon, avec un dispositif technique (réseau de mesures, transfert et stockage de données) et des moyens (investissement, matériel et fonctionnement) considérables. Il facilite l'intégration dans un réseau de chercheurs

[1] Cette convention regroupe les laboratoires suivants :

- Bureau de Recherches Géologiques et Minières - Rhône-Alpes (BRGM)
- CEMAGREF Groupement de Lyon
  U.R. biologie des écosystèmes aquatiques (UR BEA)
  U.R. hydrologie hydraulique (UR HH)
  U.R. qualité des eaux et prévention des pollutions (UR QEPP)
- Ecole Centrale de Lyon - Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique (LMFA)
- ENTPE- Laboratoire des Sciences de l'Environnement (L.S.E.)
- INSA de Lyon / UCBL Lyon 1 -Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie de l'Environnement (LGCIE)
- INSA de Lyon - Laboratoire Environnement, Ville et Société (EVS)
- UMR 5600 CNRS Universités Lumière Lyon 2, Jean Moulin Lyon 3, Jean Monnet Saint-Étienne,
- INSA Lyon, ENTPE, ENS-LSH - Equipe Développement urbain (EDU)
- UCBL Lyon 1 - UMR-CNRS 5023 - Equipe Hydrobiologie et Ecologie Souterraines (HBES)
- UCBL Lyon 1 - Laboratoire des Sciences Analytiques (LSA) - CNRS UMR 5180
- UCBL Lyon 1 – Equipe Bactéries Pathogènes Opportunistes et Environnement (BPOE)
- UJM Lyon 3 - Laboratoire de climatologie, risques, environnement (LCRE) Rattaché au Centre de Recherche en Géographie et Aménagement (CRGA)
- Université Lyon 2 - Laboratoire Environnement, ville et société (EVS) - Laboratoire rhodanien de géographie de l'Environnement (LRGE)

permettant d'optimiser ce travail, notamment grâce au partenariat privilégié avec le LGCIE de l'INSA de Lyon et le Cemagref.

Ce doctorat s'inscrit aussi dans le programme de recherche ANR *Assessing the vulnerability of peri-urban rivers* (AVuPUR – programme ANR-07-VULN-01). Ce programme de recherche, piloté par le Cemagref de Lyon, vise à améliorer les connaissances sur les hydrosystèmes péri-urbains et sur le bassin versant de l'Yzeron en particulier[1]. Ce programme de recherche nous a notamment permis de recourir au radar météorologique pour la mesure des précipitations, ce qui est venu compléter et valider les mesures au sol du dispositif de l'OTHU.

Pour répondre aux souhaits et à la commande des opérationnels du territoire urbain de l'agglomération lyonnaise, cette thèse porte sur la caractérisation de l'aléa pluvial et sur l'évaluation de la vulnérabilité urbaine dans une thématique globale d'amélioration de la gestion du risque inondation. Elle possède donc un double objectif qui s'organise ainsi en autant de points clés (fig. 1.5).

Il s'agit dans un premier temps d'améliorer la connaissance locale de la pluie, et plus particulièrement celle des phénomènes remarquables à l'aide du réseau de mesure au sol du Grand Lyon. Au commencement de ce travail, les seules données à notre disposition étaient les mesures pluviométriques du réseau au sol du Grand Lyon. Ce premier chapitre, qui se scinde en deux parties complémentaires, va donc dans un premier temps s'intéresser à l'évaluation des méthodes d'interpolation spatiale, pour aboutir à la caractérisation de cet aléa à l'aide de ce réseau de mesure au sol.

Les résultats obtenus dans le premier chapitre à l'aide des pluviomètres se doivent d'être confrontés au radar météorologique. Cet outil de mesure, qui, n'a jamais vraiment été utilisé d'une manière concrète sur l'agglomération lyonnaise, est au cœur du deuxième chapitre. L'évaluation de sa qualité de mesure est une des attentes de ce travail, et constitue la première partie de ce chapitre, alors que la deuxième porte sur l'utilisation concrète de cet outil dans l'amélioration de la connaissance de l'aléa pluvial lyonnais, en particulier au niveau des épisodes intenses.

[1] Le programme de recherche Avupur regroupe les équipes suivantes :
Cemagref de Lyon, UR HHLY
IRSTV, Ensa Nantes
Hydrowide, Grenoble 1
INSA, LGCIE
ISARA, Agropôle Lyon
UMR 5600 EVS, Université de Lyon
Cemagref de Montpellier, UMR TETIS

Les résultats des deux premiers chapitres sur la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais permettent d'étudier les relations existantes entre les pluies et les débordements du système d'assainissement. Le troisième chapitre, et plus particulièrement sa première partie, a donc pour but d'affiner les connaissances sur les causes et les effets de ces dysfonctionnements, alors que la seconde partie s'intéresse finalement à la vulnérabilité urbaine lyonnaise, en vue d'une amélioration globale de la gestion du risque d'inondation sur ce territoire.

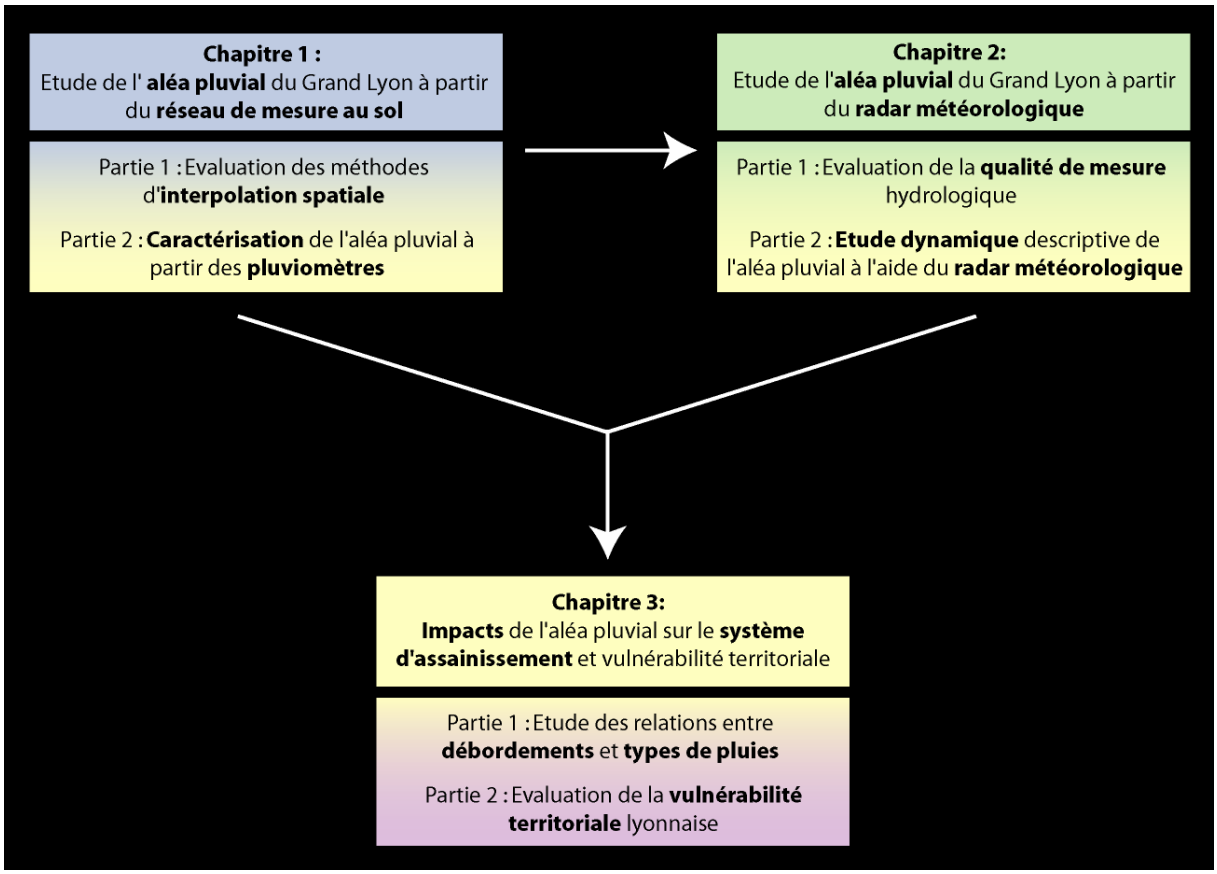


Figure 1.5 : Organisation générale du texte

Chapitre 1

Un réseau de mesure dense et fiable pour une caractérisation fine de l'aléa pluvial lyonnais

---

Partie 1 :

Des mesures au sol qui nécessitent le recours à l'interpolation spatiale

---

Au commencement de ce travail de thèse, les seules données pluviométriques à notre disposition étaient celles fournies par le réseau de mesure au sol du Grand Lyon. Les données issues du radar météorologique local n'ont été accessibles que plusieurs années après. En conséquence, le premier chapitre de cette thèse est dédié à l'exploitation du réseau de mesure au sol. Ce dernier peut déjà, à lui seul et sans l'aide complémentaire d'un radar météorologique, apporter des informations pertinentes en vue de la caractérisation des précipitations.

Le terme « précipitation » désigne toutes les eaux météoriques qui arrivent jusqu'au sol, sous quelque forme que ce soit (Laborde, 2009). Il existe de nombreuses méthodes de mesure de la pluie. De nombreux appareils ont été créés afin de quantifier les précipitations (figure 2.1). En premier lieu, les dispositifs de mesure de la pluie au sol sont apparus, avec les pluviomètres notamment. Puis, dès la seconde moitié du XX^{ème} siècle, cette mesure a pris de la hauteur avec l'apparition de technologies nouvelles fondées sur l'utilisation de radar météorologique (Anquetin, 2003 ; Creutin et al., 2009 ; Delrieu et al., 2009). La quantification des précipitations par satellite a commencé à la fin du XX^{ème} siècle (Cadet et Guillot, 1991 ; Sadouki et al, 2004), principalement pour des zones dépourvues de mesures au sol, telles que le bassin Amazonien (Dubreuil et al., 2004 ; Delahaye F., 2010). Au début du XXI^{ème} siècle, de nouvelles techniques reposant sur l'utilisation des réseaux des téléphones cellulaires ont vu le jour (Messer et al., 2006). Ces dispositifs, pour le moment expérimentaux, semblent prometteurs et pourraient se révéler efficaces dans les années à venir (Zinevich et al., 2008 ; Cummings et al., 2008). Ainsi, ce chapitre va donc se focaliser sur les techniques de mesure de la pluie au sol, les différents dispositifs et les erreurs de mesure potentielles.

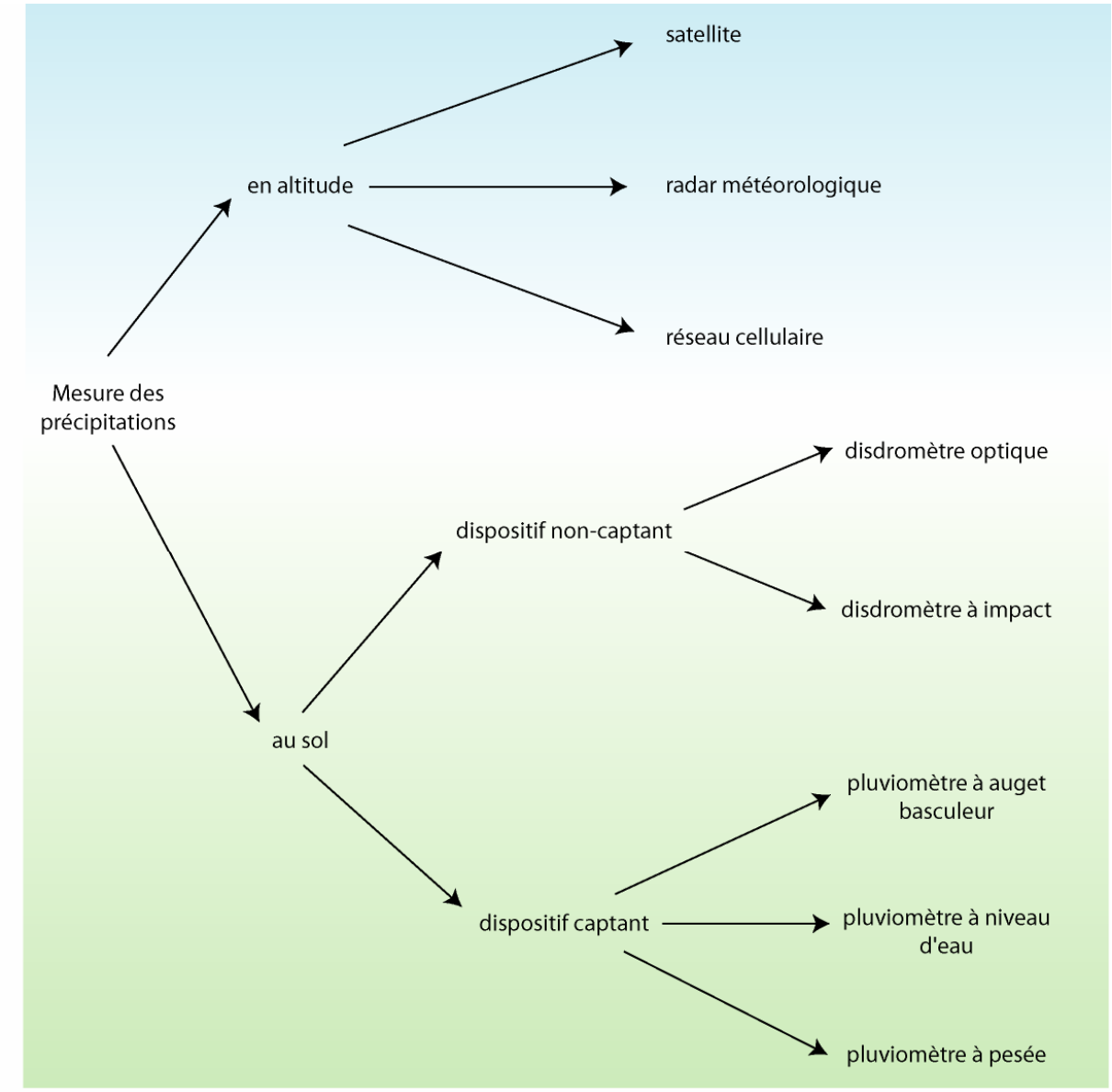


Figure 2.1 : Types de mesure des précipitations

1. Exploitation d'un réseau de mesure au sol : principes et instrumentation

1.1 Méthodes de mesure et principes de fonctionnement

Les dispositifs qui ont pour but de quantifier les précipitations au sol reposent sur des principes et des techniques très diverses et complexes (Michaelides et al., 2009). Ces appareils se divisent en deux catégories : les dispositifs qui recueillent l'eau de pluie pour la quantifier, et ceux qui comptent et mesurent les gouttes sans les intercepter (« *catching and non catching instruments* », Lanza et Stagi, 2006 et 2009a ; Lanza et Vuerich, 2009). La première catégorie collecte les précipitations à travers un orifice de taille définie et mesure le volume ou la masse d'eau équivalente accumulée durant une certaine période, tels que les pluviomètres et les pluviographes. La seconde catégorie d'appareils repose sur la détection des gouttes de pluies ou de flocons, et quantifie leur nombre et leur taille.

1.1.1 Dispositifs recueillant les précipitations

- *Le pluviomètre*

L'appareil le plus simple dans son principe qui recueille l'eau de pluie est le pluviomètre (figure 2.2). Il comporte une surface réceptrice limitée par une collerette cylindrique. L'eau qui traverse cette surface se voit dirigée par un entonnoir vers un réceptacle. Lors d'un épisode pluvieux d'une durée Δt, un volume V est récupéré à travers une surface réceptrice S. La hauteur de pluie $H_{\Delta t}$ tombée est $H_{\Delta t} = V/S$. En général, une éprouvette graduée est associée au pluviomètre et permet une lecture directe en $1/10^{ème}$ de millimètres (Laborde, 2009).

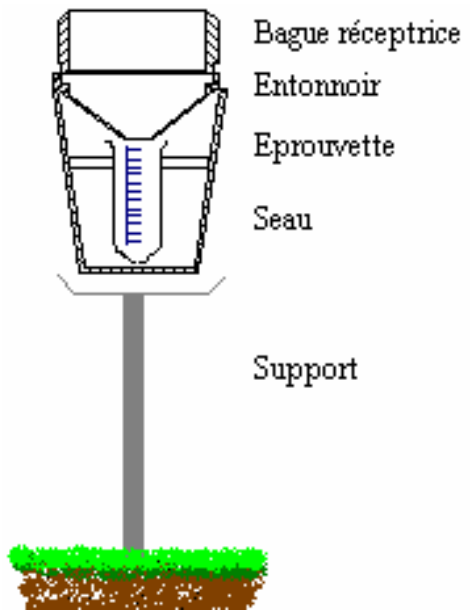


Figure 2.2 : Schéma d'un pluviomètre (adapté de Laborde, 2009)

- *Le pluviographe*

Les pluviographes ont pour but d'enregistrer la hauteur de pluie cumulée en fonction du temps, à la différence des pluviomètres qui enregistrent le cumul des pluies sur une période donnée (ce qui induit une perte d'information sur chaque événement durant la période). Trois principaux types de pluviographes existent : à niveau d'eau (« *water level* », Lanza et Stagi, 2009b ; Vuerich et al., 2009a), à augets basculeurs et à pesée.

Le pluviographe à mesure du niveau d'eau

Les pluviographes de ce type reposent sur la mesure du niveau d'eau. Ils utilisent soit un flotteur dont le niveau varie avec la hauteur d'eau (figure 2.3), soit une détection acoustique de la distance du niveau (Lanza et al., 2005), soit la conductivité de l'eau avec plusieurs détecteurs positionnés les uns au-dessus des autres. Dans le but de fournir un enregistrement possible sur une longue période de temps (24h est recommandé par l'Organisation Mondiale de la Météorologie (OMM) ; WMO, 2007 et 2008), le réceptacle doit être très grand, ou un mécanisme de vidange doit être prévu. C'est pourquoi ce type de pluviographe est ainsi parfois appelé « pluviographe à siphon », comme par J.-P. Laborde (2009). Le mécanisme de vidange est un mécanisme de grande précision et de grande fragilité qui nécessite une maintenance attentive, c'est pourquoi ces « pluviographes à siphon ne sont plus que très rarement installés » (Laborde, 2009).

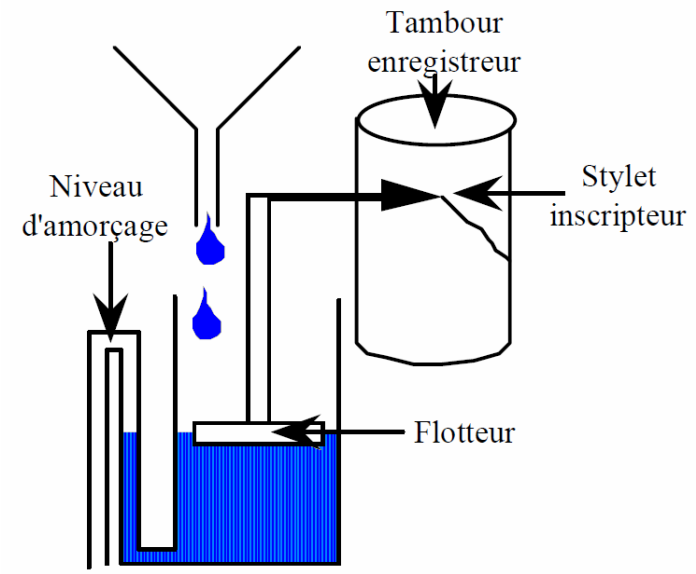


Figure 2.3 : Schéma de pluviographe à niveau d'eau avec siphon (adapté de Laborde, 2009)

Le pluviographe à augets basculeurs

Les pluviographes à augets basculeurs diffèrent des pluviomètres par la partie réceptrice en aval de l'entonnoir, après la partie captante. En effet, l'eau est dirigée vers les augets de mesures (figure 2.4).

Figure 2.4 : Augets basculeurs (vue de dessus, pluviomètre Précis Mécanique RO1 3030A du Grand Lyon – cliché : direction de l'eau du Grand Lyon)

Ces augets sont disposés symétriquement par rapport à un axe horizontal, et basculent de part et d'autre de cet axe en fonction du remplissage de chacun (figure 2.5).

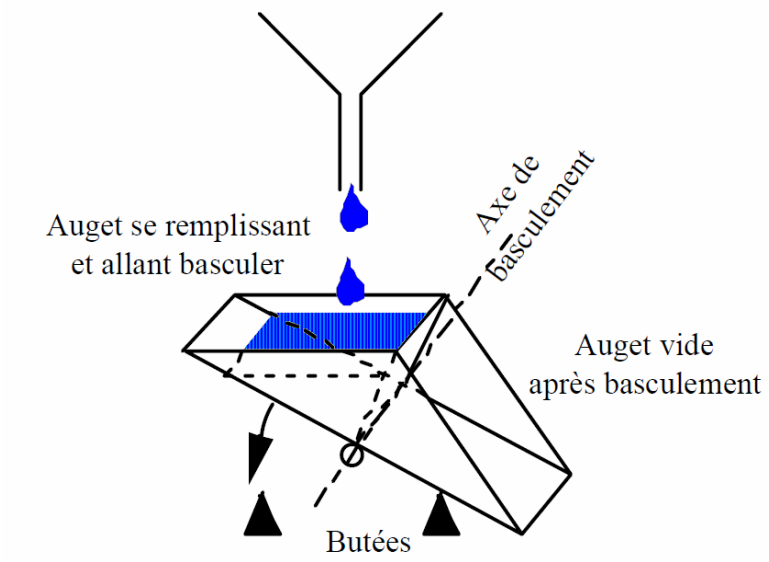


Figure 2.5 : Principe de fonctionnement des augets basculeurs (adapté de Laborde, 2009). L'auget de gauche est en cours de remplissage alors que celui de droite a déjà basculé et s'est vidé.

En effet, lors du remplissage, le centre de gravité de l'ensemble du mécanisme se déplace vers la gauche (ou vers la droite, si c'est l'auget de droite qui est en train de se remplir) jusqu'à dépasser la verticale de l'axe de rotation. Ce faisant, l'ensemble bascule alors vers la gauche (ou vers la droite), et l'auget plein se vide alors que celui de droite (ou de gauche) est venu en position de remplissage. D'après la *World Meteorological Organization* (WMO, 2008), la quantité de pluie recevable dans chaque auget ne doit pas dépasser 0,2 mm.

Les basculements des augets peuvent être comptabilisés d'une manière mécanique, avec le déplacement d'un stylet inscripteur sur un cylindre de papier, ou préférentiellement de manière électronique, avec un transducteur d'impulsions. Dans ce dernier cas, les basculements des augets sont convertis en impulsions électriques. Pour ce faire, une ampoule qui contient du mercure est fixée aux augets, et ferme un contact électrique lors du déplacement. Cependant, l'ampoule à mercure est fragile et nocive pour l'utilisateur et l'environnement en cas de casse. Ainsi se développe maintenant un système à deux relais inverseurs activés par un système à deux aimants miniatures solidaires du balancier du mécanisme, plus robuste et tout aussi précis (www.precis-mecanique.com).

En cas de précipitations solides sous forme de neige ou de grêle notamment, il arrive que le cône se colmate. Afin de se prémunir de ce problème, les constructeurs ont muni les cônes de résistances chauffantes électriques destinées à transformer les précipitations solides en précipitations liquides. Ainsi, l'équivalent en eau liquide est alors mesuré. Cependant, il s'ensuit un retard lié à la fonte qui limite les mesures.

Le pluviographe à pesée

Dans ce type d'instrument, le poids d'un conteneur avec les précipitations accumulées à l'intérieur est enregistré de manière continue. Toutes les précipitations, à la fois liquides et solides sont enregistrées. Ce type de pluviographe ne dispose pas de dispositif de vidange autonome, la capacité de stockage varie entre 150 à 1500 mm (figure 2.6). La vidange peut se faire manuellement lors des visites de contrôle, ou simplement par évaporation. Un programme interne permet de faire la différence entre la chute d'une pluie et la chute d'un objet, et dans ce cas ne prend pas en compte la variation de poids. De la même manière, la perte de poids liée à l'évaporation est sans incidence sur l'acquisition de données. Durant les périodes hivernales, un liquide antigel peut-être versé dans le réservoir afin de se prémunir des inconvénients matériels lié au gel de l'eau contenue.

Figure 2.6 : Pluviographes à pesée avec superficie de l'orifice (cm²) et hauteur de contenance (mm). (Modèle Pluvio² de Ott ; adapté de Ott, 2010a)

- *Question de dénomination*

Dans le langage courant opérationnel, la distinction sémantique entre pluviographe et pluviomètre n'est jamais faite. Pour Météo-France, « il existe deux types de pluviomètres : ceux à relevés manuels qui sont limités à des mesures quotidiennes ; les pluviomètres

transducteurs, associés à des systèmes d'acquisition, permettent d'accéder à de nombreux pas de temps (1 min, 6 min, 60 min, 3 h, 6 h, 12 h, 24 h) » (Leroy, 2000).

Le fabricant français Précis Mécanique réserve le terme « pluviographe » à ses appareils permettant un enregistrement des événements pluvieux sur bande papier. Les dispositifs qui fournissent des mesures de précipitations continues en fonction du temps sous un format numérique sont appelés « pluviomètres automatiques ».

Le fabricant allemand Ott, leader sur le marché des instruments de mesure au sol à pesée, ne fait pas de distinction et appelle ses produits des « pluviomètres » (Ott, 2010a). En anglais, ces deux termes sont traduits par « *rain gauge* » (WMO, 2008). Rarement, la distinction est faite entre des dispositifs qui fournissent des cumuls journaliers (« *daily gauges* »), et des dispositifs qui fournissent des données en fonction du temps (« *continuous gauges* ») (Einfalt et al., 2006).

Ainsi, dans la suite de ce document, la distinction entre « pluviographe » et « pluviomètre » ne sera pas effectuée, et ces derniers dispositifs seront appelés « pluviomètres », conformément au terme couramment employé dans le milieu opérationnel.

1.1.2 Les dispositifs ne recueillant pas les précipitations

À l'inverse des dispositifs dont le principe est de recueillir les précipitations afin de les quantifier, cette catégorie d'appareil les capte à distance sans contact direct. Ces appareils sont appelés des disdromètres (ou plus rarement des senseurs – Prodi et al., 2010). Deux technologies existent. La première repose sur l'utilisation d'un capteur optique. La seconde technologie se fonde sur l'impact des précipitations.

- *Le disdromètre optique*

Dans ce genre d'instrument, le passage de l'hydrométéore coupe un faisceau lumineux. Un émetteur et un capteur sont positionnés horizontalement avec un espace entre les deux pour le passage des précipitations. La lumière visible (comme chez les constructeurs Ott ou Thies), l'infrarouge ou les micro-ondes (chez PVK-Attex par exemple) peuvent servir de faisceau, bien que les lasers soient les plus souvent utilisés afin de minimiser la diffusion de la lumière par l'air et les précipitations (Lanza et al., 2010). Lorsqu'un hydrométéore traverse le faisceau lumineux situé à un mètre du sol en général (Ott, 2010b), l'énergie lumineuse reçue par le capteur diminue (figure 2.7). Les données ainsi obtenues sont traitées par un processeur de signal numérique. Les données brutes acquises

correspondent à la taille et la vitesse de chacune des particules. L'intensité et le cumul des précipitations, la réflectivité radar équivalente, la visibilité, l'énergie cinétique ainsi que le type de précipitations en sont déduits par la suite.

Figure 2.7 : Différents types de disdromètres optiques. Les formes sont variables d'un constructeur à l'autre mais les instruments reposent sur le même principe avec un émetteur et un capteur de part et d'autre d'un espace que traverse les précipitations (à gauche : Parsivell de Ott ; au centre : WXT520 de Vaisala et à droite : LPM de Thiès – photographies issues des sites des constructeurs : www.ott.com; www.vaisala.com et www.thiesclima .com).

Les disdromètres peuvent ainsi faire la différence entre tous types de précipitations, telles que la pluie, la bruine, le grésil, la grêle ou encore la neige. Ainsi, leur vocation dépasse la simple mesure des hauteurs d'eau précipitées, et trouve des applications dans des domaines variés comme en aéronautique pour les conditions de vols des avions, en agriculture et plus spécialement en viticulture, pour la gestion du trafic routier, etc. Ce type de matériel est dispendieux mais bénéficie d'un avantage non négligeable car il ne nécessite pratiquement aucun entretien ou calibrage, à la différence des pluviomètres à augets par exemple. Cela les destine à être utilisés préférentiellement en des sites isolés ou difficile d'accès.

- *Le disdromètre à impact*

Un disdromètre à impact est pourvu d'un capteur de force constitué d'une membrane en plastique ou en métal (Lanza et Stagi, 2006). Ce dernier transforme le choc causé par l'hydrométéore qui s'écrase à sa surface en impulsion électrique dont l'amplitude est proportionnelle à sa masse et à sa vitesse de chute. Ce type de disdromètre, peu répandu et fragile, est conçu pour les précipitations liquides, généralement de diamètre supérieur à 0,3 mm (figure 2.8).

Figure 2.8 : Disdromètre à impact – les impacts des gouttes de pluie sont mesurés sur la surface jaune à droite, le boîtier de gauche est le module d'acquisition (modèle RD80 du constructeur ARM, photo issu du site du fabricant www.arm.gov).

Tous ces appareils destinés à quantifier les précipitations au sol, captant les hydrométéores ou non, peuvent être sujets d'erreurs de mesure variées, surtout lors de fortes intensités. Il est classiquement fait la distinction entre les erreurs liées à la captation des précipitations (« *catching errors* »), et les erreurs liées à la mesure en elle-même (« *counting errors* » ; Einfalt et al., 2008 ; Lanza et Stagi, 2009a). L'emplacement du dispositif et le site environnant jouent aussi un rôle fondamental dans la qualité de la mesure, comme énoncé dans la partie suivante.

1.2 Les erreurs de mesure potentielles des capteurs pluviométriques au sol

Trois types d'erreurs sont classiquement reconnus dans la bibliographie, et peuvent conduire à des incertitudes de forte amplitude sur la mesure, qu'il convient de prendre en compte attentivement lors des études ultérieures (Einfalt et al., 2000 ; Duchon et Biddle, 2010). En premier lieu il convient de s'intéresser aux erreurs pouvant être engendrées par le site en lui-même. Ensuite, les erreurs liées à la captation des précipitations doivent être prises en compte, puis les erreurs liées à la mesure en elle-même (Neppel et al., 1998 et 2006).

1.2.1 Les erreurs liées au site

La mesure des précipitations est particulièrement sensible à l'exposition des capteurs (Météo-France, 2006a). Pour I. Leleu (2007) du Service Central d'Hydrométéorologie et d'Appui à la Prévision des Inondations (SCHAPI), « l'environnement du site de mesure peut générer des erreurs de mesure supérieures aux erreurs instrumentales ». Ainsi, les informations concernant le site (les métadatas) doivent être finement détaillées, avec des plans de situation ou des photographies. L'OMM recommande de compiler les angles verticaux des obstacles significatifs aux alentours du dispositif et sa hauteur de mesure (WMO, 2008). En outre, le lieu devrait être « entouré uniformément d'obstacles de hauteur uniforme » (Leroy, 2006). Pour Météo-France, la distance recommandée de ces obstacles au pluviomètre devrait être comprise entre une et deux fois la hauteur de l'obstacle (soit une hauteur angulaire des obstacles comprise entre 30° et 40°), alors que pour l'OMM, cette distance se doit d'être de deux fois la hauteur de l'obstacle (WMO, 2008).

L'OMM déconseille aussi les sites en pente ou sur le toit d'une construction. En effet, le vent est le phénomène perturbateur le plus important lors de la mesure des précipitations (Einfalt, 2001 ; Chvila et Sevruk, 2006). L'OMM divise ainsi les sites en quatre catégories dont les critères de classification sont indiqués dans le tableau 2.1 (WMO, 2008).

Classe du site	Angles verticaux entre l'instrument de mesure et la hauteur maximale de l'obstacle (°)	Description du site
Site dégagé	0 – 5	Seulement peu d'obstacles tels que des buissons ou des petits groupes d'arbres
Site principalement dégagé	6 – 12	Des groupes d'arbres et de buissons et quelques maisons
Site principalement protégé	13 – 19	Square, espace vert, lisière de forêt, centre de village, ferme, groupe de maison
Site protégé	20 - 26	Jeune forêt, espace vert avec de grands arbres, centre ville urbanisé, vallée encaissée

Tableau 2.1 : Critères de classification des sites (WMO, 2008)

A la différence de l'OMM, Météo-France répartit les sites de mesure en cinq classes, fondées sur les mêmes critères de pente, de dégagement et d'obstacles environnants, mais selon des règles plus strictes. Ces normes ont été publiées dans la note technique n°35 de Météo-France, dénommée « classification d'un site » en novembre 1999 par la direction des systèmes d'information, et portent sur les mesures de température, d'humidité, de précipitations, de vent et de rayonnement. Ce guide fournit les normes suivantes pour les sites liés à la mesure de la pluviométrie (Leroy, 1999 ; Parrel, 2007) :

- *Site en classe 1 :*

Le terrain est plat et horizontal, avec une surface de dégagement dotée d'une pente inférieure à 1/3 (soit 19°), sur une grande surface afin que la vitesse et la direction du vent ne soient pas perturbées par la topographie aux alentours. Les éventuels obstacles sont positionnés à une distance d'au moins quatre fois leur hauteur par rapport à la hauteur de captation du pluviomètre (un obstacle est un objet dont la largeur angulaire est de 10° ou plus) (figure 2.9).

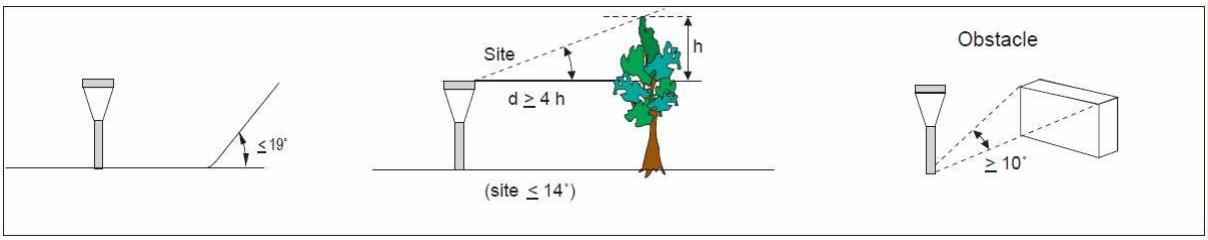


Figure 2.9 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 1 de Météo-France (Leroy, 1999).

- *Site en classe 2 :*

L'erreur de mesure liée à ce site serait de 5% environ d'après Météo-France (Leroy, 1999). Le terrain est plat et horizontal, avec une surface de dégagement dotée d'une pente inférieure à 1/3 (soit 19°). Les éventuels obstacle s sont positionnés à une distance d'au moins deux fois leur hauteur (figure 2.10).

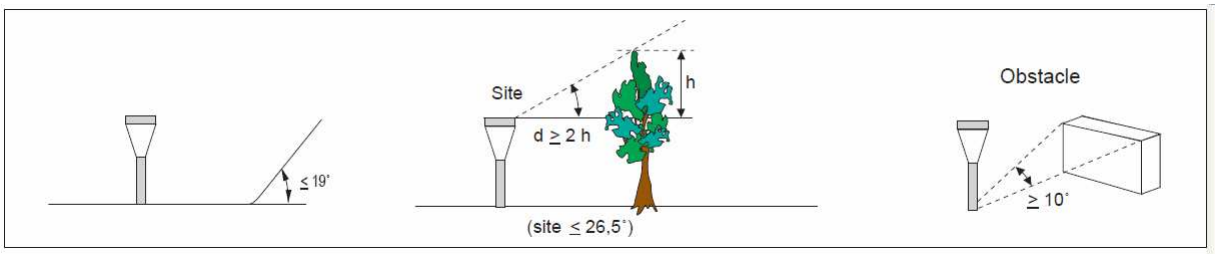


Figure 2.10 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 2 de Météo-France (Leroy, 1999).

- *Site en classe 3 :*

D'après Météo-France, l'erreur de mesure liée à ce site serait de 10 à 20% environ (Leroy, 1999). Le terrain est entouré d'une surface de dégagement dotée d'une pente inférieure à 1/2 (soit 30°). Les éventuels obstacle s sont positionnés à une distance d'au moins une fois leur hauteur (figure 2.11).

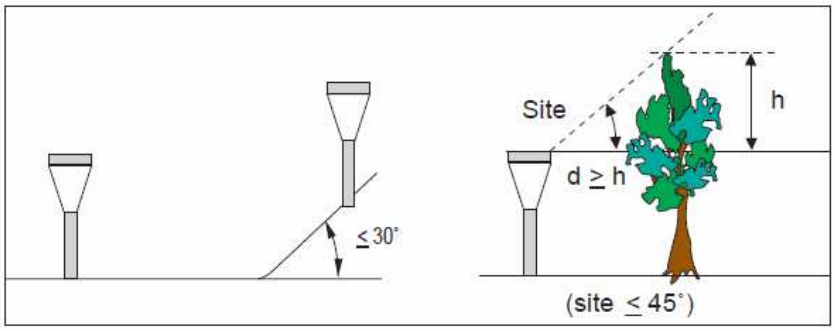


Figure 2.11 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 3 de Météo-France (Leroy, 1999).

- *Site en classe 4 :*

Ici, l'erreur de mesure liée à ce site serait supérieure à 20% (Leroy, 1999). Le terrain a une forte pente (supérieure à 30°) avec de proches obstacles (figure 2.12).

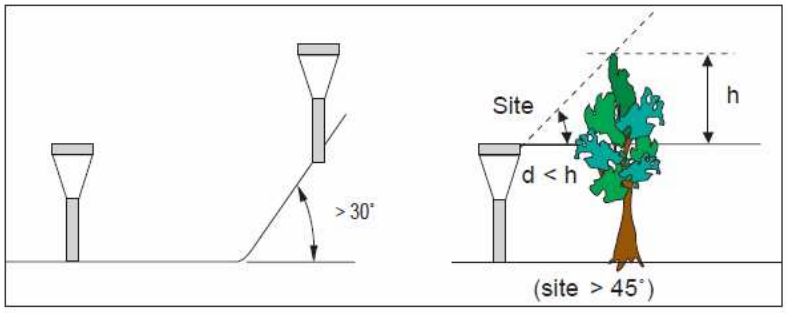


Figure 2.12 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 4 de Météo-France (Leroy, 1999).

- *Site en classe 5 :*

Dans cette configuration, l'erreur de mesure liée au site serait supérieure à 50%, avec des obstacles situés au-dessus du pluviomètre.

L'emplacement du dispositif de mesure est donc fondamental dans la précision de l'appréciation des précipitations. La majorité de ces réseaux de mesure est constituée de dispositifs recueillant ces précipitations avant de les quantifier, avec notamment des pluviomètres à augets basculeurs. Or, le captage de ces hydrométéores est aussi la source d'erreurs bien connues.

1.2.2 Les erreurs liées à la captation des précipitations

La majorité du réseau de mesure de Météo-France est constitué de pluviomètres à augets basculeurs, notamment de la marque Précis Mécanique, de modèle RO1 3030. Il en est de même pour les réseaux des grandes agglomérations telles que Lyon, Marseille ou encore Nancy. Ces pluviomètres captants sont affectés des différentes causes d'erreur lors de la réception de précipitations liquides ou solides dont il est nécessaire de tenir compte (Leroy, 2000).

- *Erreur de mouillage :*

Le principe de mesure des pluviomètres captants à flotteur et à augets basculeurs est de recueillir les précipitations liquides au fond du cône, après qu'elles ont glissé dessus. Cependant, une partie de l'eau peut rester sur le cône. Ainsi, cette eau résiduelle n'est pas mesurée. Cette erreur de mouillage est par défaut inférieure à 0,1 mm.

- *Erreur due à l'évaporation :*

Une évaporation peut intervenir à deux niveaux différents et ainsi entacher la précision de la mesure :

Sur le cône :

Une évaporation peut se manifester sur le cône, surtout en période estivale si celui-ci est chauffé par le soleil. La parade utilisée est de les peindre en blanc. Cependant, cette évaporation est assez minime, et difficile à différencier du mouillage. L'erreur serait de 0,5%.

Dans le réceptacle de mesure :

Une évaporation peut se manifester dans le réceptacle de mesure, au fond du cône dans un pluviomètre manuel, dans les augets basculeurs pour les dispositifs en comportant. Les erreurs sont généralement inférieures à 1% et se confondent avec la résolution du pluviomètre.

- *Erreur due à l'efficacité de la captation :*

Les précipitations tombant verticalement en absence de vent, l'erreur de captation est alors limitée à la tolérance de la surface de captation qui est respectée à mieux que 0,5% si cette surface est bien horizontale. Dans le cas contraire, la surface captante diminue, ce qui induit une sous-estimation des précipitations. Par exemple, un cône penché de 10° par rapport à l'horizontal diminue la surface captante de 2%.

En présence de vent, le dispositif de mesure peut déformer les filets d'air et des courants d'air verticaux sont formés par l'appareil (Chvila et Sevruk, 2006). Cela provoque

un défaut de captation qui dépend de la forme du pluviomètre et de la vitesse du vent (figure 2.13).

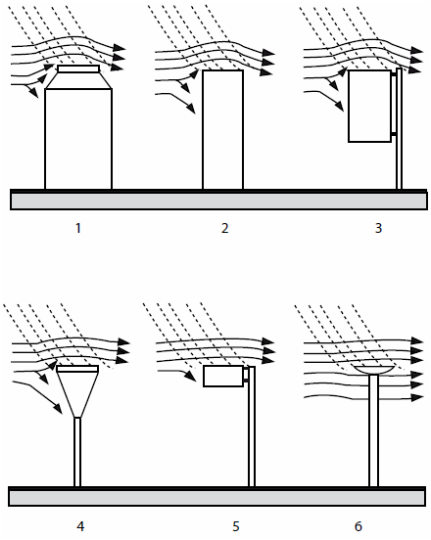


Figure 2.13 : Différentes formes de pluviomètres généralement rencontrées. Les traits pleins représentent les filets d'air et les traits pointillés matérialisent la trajectoire des précipitations. Le premier pluviomètre est celui qui provoquerait la plus grande déformation de flux d'air, au contraire du dernier. En conséquence, l'erreur liée au vent est plus importante pour le premier dispositif que le dernier (Sevruk et Nespor, 1994).

Pour limiter cet inconvénient, des brise vents ont parfois été utilisés, mais l'Organisation Météorologique Mondiale ne le recommande pas, et Météo-France n'en utilise pas opérationnellement (WMO, 2008). Un pluviomètre placé au niveau du sol évite les inconvénients liés au vent et la création de courants verticaux, mais présente des inconvénients d'installation et d'entretien « qui l'exclut des réseaux opérationnels » (Leroy, 2000).

- *Erreur de débordement :*

Lors de précipitations à forte hauteur d'eau précipitée, les pluviomètres à lecture directe peuvent déborder, si leur capacité équivalente est dépassée. Il en est de même pour les pluviomètres à augets basculeurs lors de précipitations très intenses, supérieures à 200 mm/h notamment. Le pluviomètre commence à se mettre en charge, ce qui implique une erreur de mesure considérable à cause de l'accroissement de la pression et de l'augmentation du débit, et l'eau monte dans le cône. À très forte intensité et durant une période prolongée, il peut même arriver que l'eau déborde du cône.

- *Erreurs spécifiques liées aux augets basculeurs :*

Remplissage :

Après une précipitation, un des deux augets peut contenir encore de l'eau, mais ne pas basculer. Cette eau résiduelle est prise en compte lors du prochain épisode, si elle n'est pas évaporée entre temps.

Mouillage :

Des augets mouillés sont utilisés lors de la calibration du dispositif. Cependant, il n'est pas rare d'avoir des augets secs au début d'un événement. Ce phénomène peut provoquer un décalage de 10% sur les deux premiers basculements et est pratiquement négligeable.

Réglage :

La calibration des augets est une technique pointue à réaliser en laboratoire. Sur le terrain, la tolérance de réglage de Météo-France est de 3%. Cependant, il n'est pas fondamental que le réglage soit parfait car un auget sous réglé peut compenser un auget sur réglé. L'erreur résultante liée au réglage initial et à la dérive dans le temps sur le terrain est de 5% (Leroy, 2000).

Perte lors du basculement des augets :

Le problème principal des pluviomètres à augets basculeurs est la sous-estimation des précipitations à forte intensité (Duchon et Biddle, 2010). En effet, le temps de basculement n'est pas nul et durant cette période de l'eau est perdue (figure 2.14). Plus l'intensité sera forte, plus la perte d'eau sera grande. L'inertie du système de basculement joue aussi un rôle : plus celle-ci est considérable, plus la perte est élevée. D'après M. Leroy (2000), « cette perte est rarement bien documentée par les fabricants de pluviomètres ».

En conséquence, ce volume d'eau est perdu durant le processus de mesure (Lanza et al., 2005). De ce fait, certains constructeurs comme Meteoservis, Waterlog ou Yokogawa ont développé des dispositifs de corrections mécanique ou électronique (via l'interface d'acquisition) (Lanza et Stagi, 2006).

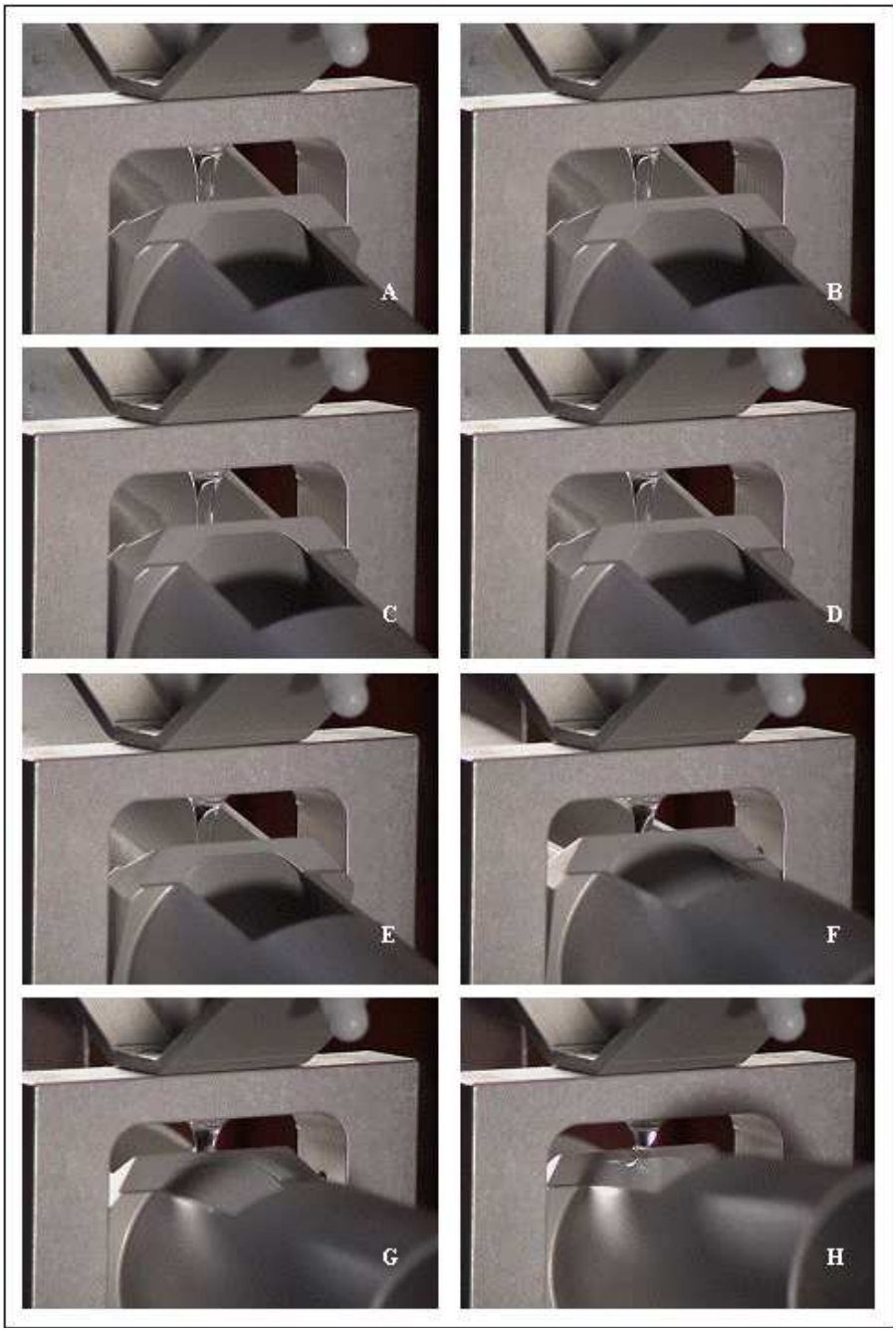


Figure 2.14 : Illustration de l'erreur mécanique inhérente et systématique des pluviomètres à augets basculeurs en huit photographies consécutives. Cette séquence va de l'initiation du mouvement de l'auget (photo en haut à gauche), jusqu'à l'instant où l'eau commence à remplir le second auget. La durée de la séquence de la photo 1 à la photo 8 est un basculement. Pendant les prises de vue F, G et H, il est visible que de l'eau tombe toujours dans l'auget de gauche alors que celui-ci a déjà atteint son volume minimal et effectue son basculement (source : Lanza et al., 2005).

1.2.3 Les erreurs liées à la précision du capteur

Comme précédemment évoqué, les capteurs ne reposent pas tous sur les mêmes principes de mesure, ce qui entraîne inévitablement des résultats différents, même minimes. Il est généralement admis que les pluviomètres à augets basculeurs sous-estiment les pluies, notamment lors des fortes intensités, à cause de la quantité d'eau perdue durant le mouvement de bascule, comme illustré préalablement (Becchi, 1970 ; Marsalek, 1981 ; Niemcznowicz, 1986 ; Lanza et al., 2005). En outre, pour une pluie identique, les capteurs de constructeurs différents fondés sur le même principe de mesure ne fournissent généralement pas les mêmes résultats (Vuerich et al., 2009). L'OMM a cependant élaboré des recommandations, afin de rendre les résultats comparables entre eux, notamment pour des stations reposant sur des principes de mesures différents et dans des environnements dissemblables (Leroy, 2007b ; WMO, 2008).

- *Incertitudes tolérées par l'OMM et point de vue de Météo-France*

Les pluviomètres doivent être capables de mesurer des intensités dans une gamme allant de 0,02 à 2000 mm/h. Les intensités allant de 0,02 à 0,2 mm/h doivent être enregistrées comme « trace » ou « pluie détectée ». Il n'y a pas de hauteur standard pour la mesure, il faut seulement éviter les rejaillissements depuis le sol, et utiliser une hauteur pratique pour la maintenance. En France, la hauteur généralement utilisée est de un mètre.

L'incertitude des mesures ne doit pas être supérieure à 0,1 mm/h pour des intensités allant de 0,2 à 2 mm/h. Pour des intensités de 2 à 2000 mm/h, elle doit être de 5% au maximum (WMO, 2008).

Pour Météo-France, « les recommandations de l'OMM sont souvent très (trop) exigeantes et il convient de se fixer ses propres objectifs lors de la constitution d'un réseau de mesure » (Leroy, 2007a). « Dans le cas de mesure en milieu urbain, il est pratiquement impossible de trouver des sites bien classés, mais il vaut mieux faire une mesure de précipitation sur un toit qu'au pied d'un immeuble » (Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques (CCROM) de Météo-France, 2007).

Les constructeurs fournissent en règle générale eux-mêmes leurs propres erreurs de mesure concernant leur matériel. Par exemple, pour le pluviomètre à augets basculeurs de Précis Mécanique de modèle RO1 3030, qui constitue la majorité des instruments de mesure de la pluie au sol du réseau de Météo-France, la précision serait de ± 2% à 60 mm/h et de ± 10 % à 270 mm/h (Précis Mécanique, 2006). Pour le pluviomètre à pesée Pluvio² du fabricant Ott, l'erreur sur un cumul serait de ± 0,05 mm, et de ± 6 mm/h sur l'intensité (Ott, 2010a).

Devant ce manque d'uniformisation des incertitudes fournies et afin de ne pas se limiter aux informations commerciales des constructeurs, l'OMM a réalisé plusieurs comparaisons objectives de dispositifs au sol sur les mesures de cumuls (tableau 2.2) (Sevruk et al., 2006), et une sur la mesure d'intensité, en laboratoire puis complétée sur le terrain (Vuerich et al., 2009a et 2009b ; Lanza et Stagi, 2009a).

Intercomparaison	I	II	III
Période	1960-1975	1972-1976	1986-1993
Hydrométéores analysés	Tous types	Pluie	Neige
But	Etablissement de coefficients correctifs entre les différents types de pluviomètres nationaux	Etude des différences de mesure entre les pluviomètres nationaux et le pluviomètre référence de l'OMM	Etude des effets du vent sur la mesure de la neige
Nombre de pays participants	6	22	10
Résultats	Non concluants	L'erreur de mesure dépend de la vitesse du vent, de l'intensité de la pluie et du type de capteurs	L'erreur de mesure dépend de la vitesse du vent, de la température et du type de capteurs
Références bibliographiques	Poncelet (1959), Struzer (1971)	Sevruk et Hamon (1984)	Goodison et al. (1998)

Tableau 2.2 : Caractéristiques des campagnes des comparaisons de mesure de précipitations de l'OMM (adapté de Sevruk et al., 2006)

- *Comparaison de l'OMM (nºVa) de dispositifs de mesures d'intensités pluviométriques en laboratoire (2004 - 2005)*

Cette campagne de comparaison, qui a débuté en 2004 pour s'achever en 2005 est la première de l'OMM à porter sur la mesure d'intensité de pluie. Cette étude a pour but

d'évaluer les erreurs liées à la captation et à la précision du capteur. Douze modèles de pluviomètres à augets basculeurs, cinq modèles de pluviomètres à pesée et deux pluviomètres à niveau d'eau ont été testés (regroupant 18 constructeurs internationaux) (tableau 2.3). Ces appareils ont été soumis en laboratoire à un flux d'eau constant, avec différentes intensités, et leurs capacités de mesure ont été évaluées (Lanza et Stagi, 2009a et 2009b).

Fabricant (pays)	Type de modèle	Principe
MC VAN Instruments (Australie)	RIMCO 7499	Augets basculeurs
Hydrological Services (Australie/HMEI*)	TB-3	Augets basculeurs
PAAR (Autriche)	AP23	Augets basculeurs
WATERLOG (USA/HMEI*)	H340 . SDI	Augets basculeurs (avec correction)
METEOSERVIS (Rép. Tchèque)	MR3H	Augets basculeurs (avec correction)
India Meteorological Dept. (Inde)	TBRG	Augets basculeurs
CAE (Italie)	PMB2	Augets basculeurs (avec correction)
ETG (Italie)	R102	Augets basculeurs (avec correction)
SIAP (Italie)	UM7525	Augets basculeurs
YOKOGAWA DENSHI KIKI (HMEI*)	WMB01	Augets basculeurs (avec correction)
LAMBRECHT (Suisse)	1518 H3	Augets basculeurs
CASELLA (Royaume-Uni/HMEI*)	100000E	Augets basculeurs
GEONOR (Norvège/HMEI*)	T-200B	Pesée
MPS SYSTEM (Slovaquie)	TRWS	Pesée
OTT HYDROMETRY (Allemagne)	Pluvio	Pesée
METEOSERVIS (Rép. Tchèque)	MRW500	Pesée
VAISALA (Finlande)	VRG101	Pesée
SEROSI (France)	SEROSI	Niveau d'eau
AXYS Env. Sys. (Canada)	ALLUVION 100	Niveau d'eau

Tableau 2.3 : Caractéristiques des types de pluviomètres testés par l'OMM en laboratoire lors de la comparaison sur la mesure des intensités Iva (adapté de Lanza et al., 2005) (: HMEI est une association dénommée « Hydro-Meteorological Equipment Industry » qui regroupe des fabricants d'appareils de mesure du monde entier).*

Les résultats sont clairs et des tendances se dégagent nettement (Lanza et Stagi, 2006 ; Lanza et al., 2005). Les pluviomètres à augets basculeurs sans dispositifs de correction montrent des capacités de mesure limitées (à l'exception du RIMCO de Mc Van), avec des erreurs de sous-estimation allant jusqu'à 15 ou 20% pour des précipitations d'intensité de 300 mm/h, et ne rentrent donc pas dans les recommandations prescrites par l'OMM (5% d'erreur). A l'inverse, les pluviomètres à augets équipés d'un système de correction mécanique ou logiciel montrent des résultats bien plus satisfaisants et conformes aux recommandations de l'OMM (figure 2.15).

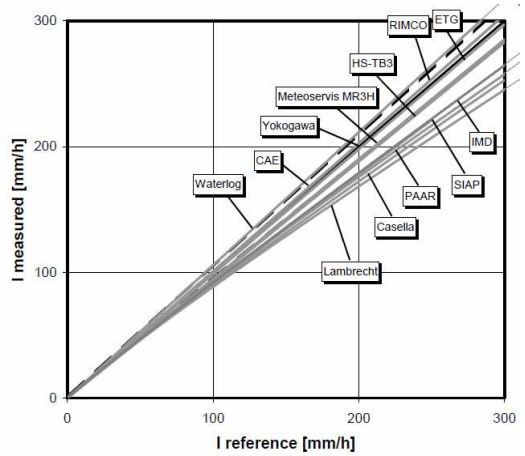


Figure 2.15 : Courbes de réponses des intensités mesurées (I measured) en fonction des intensités de référence (I reference) (en mm/h) des pluviomètres à augets basculeurs (les tirets matérialisent les courbes d'erreurs de 5%) (Lanza et al., 2005).

Les pluviomètres à pesée fournissent des résultats encore plus précis, sans erreur notable (figure 2.16).

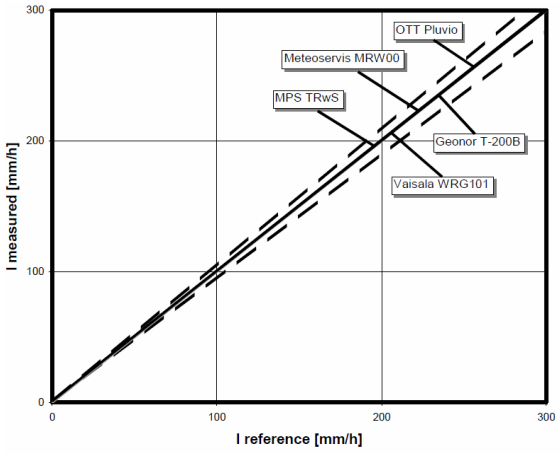


Figure 2.16 : Courbes de réponses des intensités mesurées (I measured) en fonction des intensités de référence (I reference) (en mm/h) des pluviomètres à pesée (les tirets matérialisent les courbes d'erreurs de 5%) (Lanza et al., 2005).

Les pluviomètres dont la mesure repose sur la lecture du niveau d'eau ont des résultats très différents. Le modèle Alluvion d'Axys montre de grosses erreurs de mesure, même à faible intensité, alors que le pluviomètre Serosi a une incertitude qui ne dépasse pas 3% à 300 mm/h, ce qui remplit totalement les recommandations de l'OMM (figure 2.17).

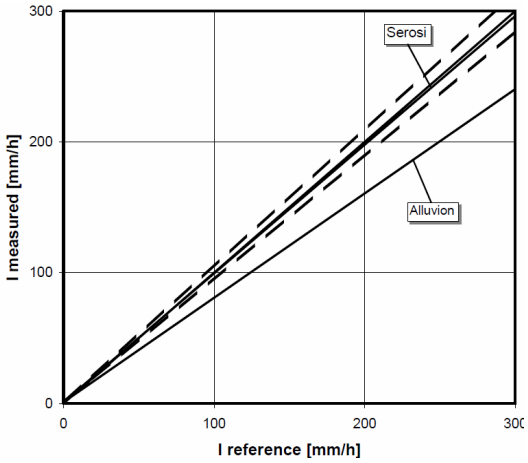


Figure 2.17 : Courbes de réponses des intensités mesurées (I measured) en fonction des intensités de référence (I reference) (en mm/h) des pluviomètres à niveau d'eau (les tirets matérialisent les courbes d'erreurs de 5%) (Lanza et al., 2005).

Afin de compléter cette étude en laboratoire, l'OMM a réalisé entre le 1er octobre 2007 et le 30 avril 2009 une analyse sur le terrain qui a regroupé 25 dispositifs de mesure au sol fondés sur les différentes techniques précédemment détaillées (Vuerich et al., 2009a).

- *Comparaison de l'OMM (n°Vb) de dispositifs de mesures d'intensités pluviométriques sur le terrain (2007 - 2009)*

Cette étude a recensé 25 instruments de mesure des précipitations de tous les types existants (recueillant ou non l'eau de pluie) (tableau 2.4). Elle avait pour but de comparer leurs réponses à différents niveaux d'intensité, face à trois dispositifs de mesure de référence installés au niveau du sol. Avant l'installation, tous les appareils avaient été calibrés au laboratoire météorologique de l'université de Gênes. Le site d'expérimentation est un terrain plat engazonné de 400 m², où tous les instruments sont installés à 1 mètre du sol (figure 2.18) (Vuerich et al., 2009b).

Modèle – Fabricant	Principe de mesure	Testé lors de la comparaison en laboratoire (WMO IVa)
RIM7499020-McVan	Augets basculeurs	oui
AP23-PAAR	Augets basculeurs	oui
R01 3070-Precis-Mecanique	Augets basculeurs (avec correction)	non
PT 5.4032.35.008-THIES	Augets basculeurs (avec correction)	non

R 102-ETG	Augets basculeurs (avec correction)	oui
DQA031-LSI LASTEM	Augets basculeurs	non
UMB7525/I-SIAP-MICROS	Augets basculeurs (avec correction)	oui
PMB2-CAE	Augets basculeurs (avec correction)	oui
Rain Collector II-DAVIS	Augets basculeurs	non
LB-15188-LAMBRECHT	Augets basculeurs (avec correction)	oui
PARSIVEL-OTT	Disdromètre optique	non
LPM-THIES	Disdromètre optique	non
LCR “DROP”-PVK ATTEX	Disdromètre optique	non
PP040-MTX	Augets basculeurs	non
ARG100-EML	Augets basculeurs	non
MRW500-METEOSERVIS	Pesée	oui
VRG101-VAISALA	Pesée	oui
PLUVIO-OTT	Pesée	oui
PG200-EWS	Pesée	non
T200B - GEONOR	Pesée	oui
TRwS-MPS	Pesée	oui
ANS 410/H-EIGENBRODT	Disdromètre à impact	non
Electrical rain gauge-KNMI	Niveau d’eau	non
PWD22-VAISALA	Disdromètre optique	non
WXT510-VAISALA	Disdromètre à impact	non

Tableau 2.4 : Caractéristiques des types de pluviomètres testés par l’OMM sur le terrain lors de la comparaison sur la mesure des intensités IVb (adapté de Vuerich et al., 2009a).

Figure 2.18 : Site expérimental de l'intercomparaison IVb de l'OMM à Vigna di Valle (Italie) (Vuerich et al., 2009a)

Les résultats de la comparaison sur le terrain confirment ceux obtenus en laboratoire concernant les dispositifs captants, et fournissent des résultats novateurs concernant les dispositifs non captants (figure 2.19) (Sevruk et et al., 2009).

La supériorité des pluviomètres à augets basculeurs bénéficiant d'une correction (logicielle ou mécanique) face à ceux qui n'en disposent pas est encore une fois démontrée (figure 2.19a). Les pluviomètres à augets sans correction ne rentrent pas dans les préconisations de l'OMM (à l'exception du PP040-MTX). Les dispositifs à correction fournissent de bien meilleurs résultats et sont conformes aux recommandations de l'OMM, sans pour autant parvenir au niveau des pluviomètres à pesée (figure 2.19b, c et d). Ces derniers font preuve d'une excellente précision, même aux intensités les plus fortes, à l'exception du modèle de Vaisala (figure 2.19e). Les deux meilleurs pluviomètres à pesée, le PLUVIO du fabricant Ott et le T200B de Geonor fournissent respectivement des coefficients de détermination (r^2) de 0,9 et 0,89 à partir du nuage de corrélation entre valeurs de référence et valeurs mesurées. Le pluviomètre à niveau d'eau *Electrical rain gauge KNMI* ne fournit pas des résultats probants (figure 2.19d).

Les appareils de mesure non captants étaient pour la première fois confrontés à une comparaison sur le terrain. Il ressort que ces appareils ont plusieurs avantages car ils nécessitent une maintenance très restreinte, ce qui les prédestine à être installés en des sites difficiles d'accès. En outre, ils ont la possibilité de renseigner sur les types de précipitations. Cependant, leur mesure n'est pas d'une très grande précision, même à des intensités de l'ordre de 50 mm/h (figure 2.19f).

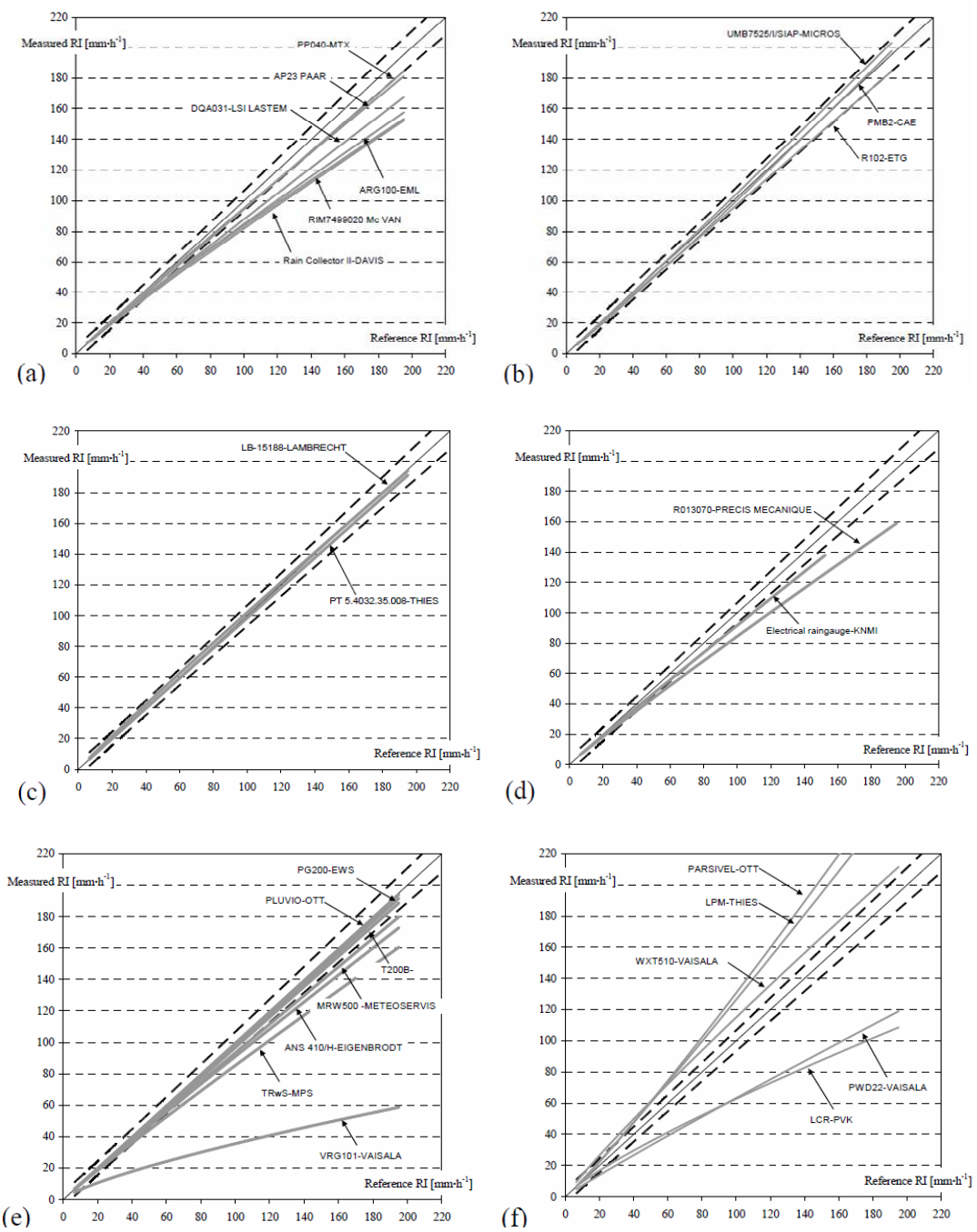


Figure 2.19 : Nuages de régression des différents dispositifs de mesure entre les intensités de référence et les intensités mesurées (mm/h) : pluviomètres à augets sans correction (a), pluviomètres à augets avec correction (b) (c) et (d), pluviomètres à lecture du niveau d'eau (d), pluviomètres à pesée (e) et appareils non captant (f) (Lanza et al., 2010)

Pour finir, nous pouvons nous interroger sur la précision relative du pluviomètre RO1 3070 de Précis Mécanique (figure 2.19d), développé notamment dans le cadre du projet Salamandre (stations pluviométriques automatiques mises en œuvre pour la direction de

l'eau) du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, de Météo-France et du Schapi (Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations). Une centaine de ces stations automatiques est déployée, notamment sur « le sud-est, souvent concerné par les problèmes de crues » (Météo-France, 2006b). Enfin, le pluviomètre Alluvion à mesure du niveau d'eau du fabricant français Serosi fournissait des résultats très probants en laboratoire (figure 2.17). Il est regrettable que ce pluviomètre n'ait pas été retenu et testé en conditions réelles sur le terrain.

1.2.4 Les erreurs liées à des facteurs externes

En addition des erreurs liées au site, à la captation et à la précision du capteur, d'autres types d'erreurs peuvent intervenir et perturber la fiabilité de la mesure. En effet, la maintenance du matériel est un paramètre extrêmement important à prendre compte (Météo-France, 2006a ; Paquet, 2007). La fiabilité des mesures dépend également de la fourniture en électricité. La transformation des mesures analogiques en valeurs numériques peut aussi entraîner une perte d'information, ainsi que la transformation des données brutes à pas de temps variable en données à pas constants (Einfalt, 2001), notamment dans le cas du cumul de basculements d'augets sur une période donnée (sur six minutes par exemple).

1.3 Le réseau de mesure au sol de la communauté urbaine de Lyon

Les données pluviométriques utilisées dans ce travail reposent en partie sur l'utilisation du réseau de mesure au sol de la communauté urbaine de Lyon. Dès 1985, la direction de l'eau du Grand Lyon a procédé à l'installation d'un réseau de mesure de la pluie sur son territoire. « Le choix d'une répartition aussi régulière que possible était justifié par une hypothèse *a priori* d'homogénéité du phénomène pluvieux sur tout le territoire, (même s'il apparaissait probable que les zones à relief tourmenté risquaient d'induire des variations spatiales d'intensités plus importantes que les zones plates) » (Direction de l'eau du Grand Lyon, 2005). Le nombre d'une trentaine de stations sur ce territoire a paru constituer un compromis acceptable entre les différentes exigences telles que le coût d'investissement, le nombre de sites d'implantation ou l'entretien des capteurs, et permettait d'obtenir une distance moyenne de quatre kilomètres entre les postes.

1.3.1 Capteurs utilisés

Les capteurs utilisés sont des pluviomètres à augets basculeurs du fabricant français Précis Mécanique, de modèle RO1 3030 A (Météo-France utilise le même modèle pour la plupart des sites de son réseau). Le cône de réception est de 1000 cm², avec un auget de 2 cl, soit une résolution de 0,2 mm (figure 2.20 et annexe 1 : sites pluviométriques du Grand Lyon). Ils sont tous équipés de réchauffeur afin de faire fondre la neige et d'éviter le blocage de l'auget par le gel.

Figure 2.20 : Pluviomètre de Mions (cliché : direction de l'eau du Grand Lyon)

L'ensemble du parc pluviométrique va être rénové en 2010. Les pluviomètres à augets vont être remplacés par des pluviomètres à pesée de type Pluvio² du fabricant allemand Ott, d'une contenance de 750 mm² pour une ouverture de 400 cm² (figure 2.6). La précédente génération de ces pluviomètres était la plus précise de tous les dispositifs testés sur le terrain par l'OMM lors de la comparaison IVb (Lanza et al., 2010).

Bien que plus onéreux, ces pluviomètres sont d'une maintenance bien moindre que les pluviomètres à augets car ils ne disposent pas de mécanique de précision, seulement d'une balance de précision. Le fonctionnement en est donc facilité, ainsi que le suivi opérationnel. Les sites de mesure ne changeront pas. Un nouveau site va être ouvert sur les communes de Givors ou de Grigny, nouvellement arrivées dans la communauté urbaine depuis 2008. Ces sites situés à l'extrême sud-ouest de l'agglomération seront très intéressants dans l'étude des processus pluvieux. En outre, il est envisagé de doubler quatre sites existants, en faisant fonctionner pendant deux à trois ans parallèlement les pluviomètres à augets et à

pesée. Ce doublement permettra de comparer les différences de mesure d'un type d'appareil à un autre, à la manière des comparaisons de l'OMM, toutes proportions gardées.

1.3.2 Rapatriement de données

Deux époques distinctes caractérisent le rapatriement et l'enregistrement des données. De l'origine du projet jusqu'à 1990, les pluviomètres étaient équipés d'enregistreurs sur cassette magnétique. Ils fournissaient des données par pas de temps de six minutes et les données étaient relevées une fois par mois. Le système de récupération était hasardeux et les pertes de données étaient fréquentes et considérables. En conséquence, il a été décidé de moderniser le système et de rapatrier les données à l'aide de liaisons téléphoniques RTC spécialisées. En outre, les données sont maintenant rapatriées toutes les nuits au service études de la direction de l'eau et la mise à disposition en est donc beaucoup plus rapide. Les impulsions des augets sont toujours transformées en pas de temps de six minutes puis épurées automatiquement. Cependant, la possibilité d'effectuer une sauvegarde de ces impulsions est possible, notamment en cas de précipitations remarquablement intenses ou de données douteuses.

1.3.3 Répartition du réseau dans l'agglomération

Dès l'origine, l'installation des pluviomètres sur tout le territoire a répondu à des critères de répartition homogène et de coût d'investissement et de fonctionnement. Même si la plupart des installations date de 1985, ce réseau a subi des modifications au cours du temps, avec la désaffection de trois sites (Tête d'Or, Solaize et Pierre-Bénite) et l'ouverture de nouveaux (Sainte-Consorce et Saint-Fons notamment au début des années 2000) (tableau 2.5). Ces modifications ont été induites pour plusieurs raisons, comme le vandalisme ou les modifications d'usage de l'occupation du sol. Cependant, l'objectif est de réduire au maximum ces changements, et d'éviter la fermeture de sites. Au final, « l'immense majorité des pluviomètres disposent d'au moins 20 années de mesures sans dysfonctionnement majeur » (Chocat et Bardin, 2007).

Pluviomètres	X	Y	Z	Site	Propriétaire	Date de mise en service	Date de mise hors service
St Germain	791,604	101,802	171,8	Station d'épuration	Grand Lyon	06/11/1997	
Montanay	797,141	101,190	100,9	Bassin de rétention / infiltration	Grand Lyon	31/12/1984	
Neuville	794,245	99,515	168,7	Station d'épuration	Grand Lyon	31/12/1984	
Poleymieux	791,310	98,440	421,0	Réservoir de Planchamp	SDEI	31/12/1984	
Couzon	793,840	97,110	168,2	Station d'épuration	Grand Lyon	31/12/1984	

Cailloux	797,853	97,476	259,9	Bassin de rétention	Grand Lyon	31/12/1984	
Rilleux	798,031	93,909	271,0	Complexe sportif	Commune de Rillieux	01/03/1987	
Collonges	795,165	93,815	167,8	Terrain communal de Collonges	Grand Lyon	31/12/1984	
Limonest	788,670	95,560	358,2	Lycée agricole	Grand Lyon	31/12/1984	
Champagne	789,865	91,460	286,0	Stade municipal	Grand Lyon	31/12/1984	
Salvagny	784,625	93,370	340,4	Caserne sapeurs pompiers	Grand Lyon	31/12/1984	
Crépieux	798,880	92,600	174,0	Station de relevage des eaux	Grand Lyon	01/05/1995	
Insa	797,330	90,270	169,2	Université Lyon I	INSA	01/01/1992	
Meyzieu	806,700	91,400	187,7	Station d'épuration	Grand Lyon	01/12/1992	
Jonage	809,900	92,000	185,2	Station d'épuration	Grand Lyon	31/12/1984	
Genas	807,875	86,385	230,2	Décharge publique	Grand Lyon	31/12/1984	
Villeurbanne	800,865	86,710	186,7	Direction de l'eau Grand Lyon	Grand Lyon	31/12/1984	
Bron	802,905	83,610	200,1	Aéroport	Météo-France	31/12/1984	
Loyasse	792,660	87,727	293,2	Cimetière	Ville de Lyon	31/12/1984	
Battière	790,125	86,280	270,7	Gymnase	Ville de Lyon	31/12/1984	
Bollier	794,181	84,594	163,8	Direction de l'eau Grand Lyon	Grand Lyon	31/12/1984	
Pressin	790,200	81,700	260,4	Centre privé d'enseignement	Grand Lyon	31/12/1984	
St Priest	801,140	80,895	198,4	Direction de l'eau	Grand Lyon	31/12/1984	
Mions	804,320	75,750	223,2	Station de pompage	Grand Lyon	31/12/1984	
Corbas	800,791	77,828	200,3	Bassin de rétention	Grand Lyon	31/12/1984	
Sérézin	794,230	74,620	165,7	Station de relèvement	Grand Lyon	21/01/1998	
Ste Consorce	783,590	89,013	357,3	Réservoir d'eau	SIDESOL	01/11/2002	
St Fons	795,524	79,929	167,9	Station d'épuration	Grand Lyon	27/06/2003	
St Genis	791,135	77,040	270,7	Lycée agricole	Grand Lyon	31/12/1984	
Pierre Bénite	795,524	79,929	163,7	Station d'épuration	Grand Lyon	31/12/1984	27/06/2003
Solaize	794,230	74,620	160,6	Institut français du pétrole	Grand Lyon	31/12/1984	16/01/1998
Tête d'Or	795,990	89,074	167,2	Parc urbain	Ville de Lyon	31/12/1984	01/04/2002

Tableau 2.5 : Coordonnées Lambert zone II (km), altitudes NGF (m), sites, propriétaires et dates de fonctionnement des pluviomètres du Grand Lyon

Aujourd'hui, 29 pluviomètres de la communauté urbaine sont opérationnels dans l'agglomération (figure 2.21), ce qui donne une densité d'un poste pour 18 km² environ. Cette quantité est un compromis acceptable pour la Direction de l'eau du Grand Lyon entre les différentes exigences telles que le coût, le nombre de sites d'implantation ou l'entretien et la maintenance, et la densité de mesure. Ce réseau est homogènement réparti, avec cependant des zones moins denses dans l'est de l'agglomération, notamment au niveau de l'est de Lyon et des communes de Vaulx-en-Velin, de Décines-Charpieu et de Vénissieux.

Plusieurs de ces pluviomètres sont situés en périphérie (Salvagny, Pressin, Saint-Genis, ou Mions par exemple) ou à quelques centaines de mètres à l'extérieur de la communauté (Sainte-Consorce ou Sérézin notamment) ce qui permet de se prémunir des « effets de bords » et garantir une représentativité optimale, y compris en périphérie, et pas uniquement au centre de l'agglomération.

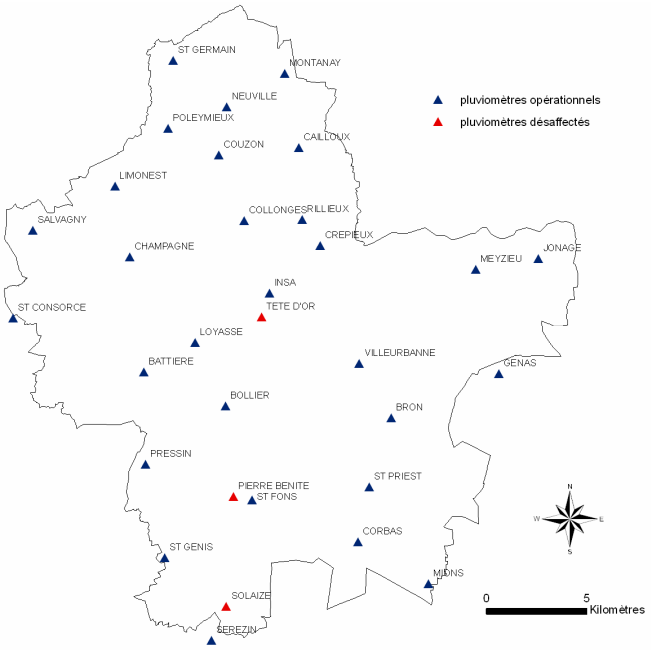


Figure 2.21 : Pluviomètres opérationnels et désaffectés du Grand Lyon

Les tableaux 2.6a et 2.6b nous renseignent sur les distances entre chacun des postes opérationnels.

	VILLEURBANNE	JONAGE	ST PRIEST	CREPIEUX	BOLLIER	ST FONS	NEUVILLE	COUZON	INSA	GENAS	CORBAS	MIONS	LOYASSE	PRESSIN
VILLEURBANNE	0,0	10,4	6,2	6,2	7,0	8,6	14,4	12,6	5,7	7,0	8,9	11,5	8,3	11,8
JONAGE	10,4	0,0	14,2	10,9	17,3	18,7	17,3	16,8	13,5	6,1	16,8	17,1	**17,6**	**22,1**
ST PRIEST	6,2	14,2	0,0	12,3	8,2	5,9	20,2	18,2	10,9	8,6	**2,8**	5,6	11,3	11,2
CREPIEUX	6,2	10,9	12,3	0,0	9,3	13,1	8,3	6,8	**3,5**	11,0	14,9	17,7	7,9	14,0
BOLLIER	7,0	17,3	8,2	9,3	0,0	**4,9**	14,9	12,5	6,1	13,7	9,5	13,4	3,5	4,9
ST FONS	8,6	18,7	5,9	13,1	4,9	0,0	19,6	17,3	10,4	13,8	5,7	9,7	8,3	5,6
NEUVILLE	14,4	17,3	20,2	8,3	14,9	19,6	0,0	**2,4**	9,5	19,0	22,6	25,8	11,9	18,2
COUZON	12,6	16,8	18,2	6,8	12,5	17,3	**2,4**	0,0	7,3	17,8	20,5	23,8	9,5	15,8
INSA	5,7	13,5	10,9	3,5	6,1	10,4	9,5	7,3	0,0	12,2	13,2	16,5	4,5	10,5
GENAS	7,0	6,1	8,6	11,0	13,7	13,8	19,0	17,8	12,2	0,0	10,9	11,0	15,2	18,2
CORBAS	8,9	16,8	**2,8**	14,9	9,5	5,7	22,6	20,5	13,2	10,9	0,0	**4,1**	12,8	11,3
MIONS	11,5	17,1	5,6	17,7	13,4	9,7	25,8	23,8	16,5	11,0	4,1	0,0	16,7	15,3
LOYASSE	8,3	17,6	11,3	7,9	**3,5**	8,3	11,9	9,5	4,5	15,2	12,8	16,7	0,0	6,5
PRESSIN	11,8	22,1	11,2	14,0	4,9	5,6	18,2	15,8	10,5	18,2	11,3	15,3	6,5	0,0
LIMONEST	15,1	21,4	19,6	10,7	12,3	17,1	6,8	5,4	9,4	21,3	21,5	25,2	8,8	13,9
POLEYMIEUX	15,1	19,6	20,5	9,6	14,1	19,0	3,1	2,9	9,6	20,6	22,7	26,2	10,8	16,8
SALVAGNY	17,6	25,3	21,1	14,4	13,0	17,3	11,5	10,0	12,2	24,3	22,5	26,5	9,9	13,0
COLLONGES	9,2	14,8	14,7	4,0	9,3	13,9	5,7	3,5	3,8	14,9	17,0	20,3	6,6	13,1
SEREZIN	15,6	25,1	11,0	**20,4**	11,7	7,3	**26,6**	**24,2**	**17,5**	19,5	8,8	11,2	14,8	9,4
ST GERMAIN	**17,7**	20,7	**23,4**	11,8	**17,4**	**22,2**	3,5	5,2	12,5	22,5	**25,7**	**29,0**	14,1	20,2
BATTIERE	10,8	20,5	12,6	10,9	4,4	8,3	13,9	11,5	7,4	17,7	13,6	17,7	**2,9**	**4,6**

BRON	**3,2**	10,8	3,6	9,3	8,3	8,0	17,5	15,7	8,7	5,8	6,4	8,4	10,5	12,5
MONTANAY	14,9	15,7	21,0	8,7	16,8	21,3	3,4	5,2	11,0	18,4	23,6	26,4	14,2	20,7
CHAMPAGNE	12,7	20,4	16,6	9,5	8,9	13,6	8,9	6,7	7,2	19,3	18,2	22,1	5,4	10,4
CAILLOUX	11,2	13,2	17,3	5,0	13,4	17,7	4,1	4,0	7,4	15,1	19,9	22,7	11,0	17,5
RILLIEUX	7,7	11,9	13,8	**1,6**	10,1	14,2	6,7	5,3	4,0	12,5	16,3	19,2	8,2	14,5
MEYZIEU	7,5	**3,2**	12,1	7,8	14,2	16,0	14,8	14,0	10,4	**5,3**	14,8	15,8	14,5	19,1
ST CONSORCE	17,4	**26,4**	19,7	15,7	11,5	15,0	15,0	13,1	12,8	**24,4**	20,5	24,6	9,2	9,9
ST GENIS	13,7	23,9	10,8	17,4	8,1	5,2	22,7	20,3	14,2	19,0	9,7	13,2	10,8	4,8

Tableau 2.6a : Distances (en km) entre les pluviomètres opérationnels du Grand Lyon (en rouge et en bleu respectivement les postes voisins les plus éloignés et les plus proches)

	LIMONEST	**POLEYMIEUX**	**SALVAGNY**	**COLLONGES**	**SEREZIN**	**ST GERMAIN**	**BATTIERE**	**BRON**	**MONTANAY**	**CHAMPAGNE**	**CAILLOUX**	**RILLIEUX**	**MEYZIEU**	**ST CONSORCE**	**ST GENIS**
VILLEURBANNE	15,1	15,1	17,6	9,2	15,6	17,7	10,8	**3,2**	14,9	12,7	11,2	7,7	7,5	17,4	13,7
JONAGE	21,4	19,6	25,3	14,8	25,1	20,7	**20,5**	10,8	15,7	20,4	13,2	11,9	**3,2**	**26,4**	23,9
ST PRIEST	19,6	20,5	21,1	14,7	11,0	23,4	12,6	3,6	21,0	16,6	17,3	13,8	12,1	19,7	10,8
CREPIEUX	10,7	9,6	14,4	4,0	20,4	11,8	10,9	9,3	8,7	9,5	5,0	1,6	7,8	15,7	17,4
BOLLIER	12,3	14,1	13,0	9,3	11,7	17,4	4,4	8,3	16,8	8,9	13,4	10,1	14,2	11,5	8,1
ST FONS	17,1	19,0	17,3	13,9	7,3	22,2	8,3	8,0	21,3	13,6	17,7	14,2	16,0	15,0	5,2
NEUVILLE	6,8	3,1	11,5	5,7	26,6	3,5	13,9	17,5	**3,4**	8,9	4,1	6,7	14,8	15,0	22,7
COUZON	5,4	**2,9**	10,0	3,5	24,2	5,2	11,5	15,7	5,2	6,7	4,0	5,3	14,0	13,1	20,3
INSA	9,4	9,6	12,2	3,8	17,5	12,5	7,4	8,7	11,0	7,2	7,4	4,0	10,4	12,8	14,2
GENAS	21,3	20,6	24,3	14,9	19,5	22,5	17,7	5,8	18,4	19,3	15,1	12,5	5,3	24,4	19,0
CORBAS	21,5	22,7	22,5	17,0	8,8	25,7	13,6	6,4	23,6	18,2	19,9	16,3	14,8	20,5	9,7
MIONS	**25,2**	**26,2**	**26,5**	20,3	11,2	**29,0**	17,7	8,4	26,4	**22,1**	22,7	19,2	15,8	24,6	13,2
LOYASSE	8,8	10,8	9,9	6,6	14,8	14,1	**2,9**	10,5	14,2	5,4	11,0	8,2	14,5	9,2	10,8
PRESSIN	13,9	16,8	13,0	13,1	9,4	20,2	4,6	12,5	20,7	10,4	17,5	14,5	19,1	9,9	4,8
LIMONEST	0,0	3,9	4,7	6,7	23,1	6,9	9,4	18,0	10,2	**3,6**	9,4	9,5	18,5	8,3	18,7
POLEYMIEUX	3,9	0,0	8,4	6,0	25,6	**3,4**	12,2	18,3	6,5	6,7	6,6	8,1	16,9	12,2	21,4
SALVAGNY	4,7	8,4	0,0	10,5	22,3	11,0	9,0	20,2	14,8	5,0	13,9	13,5	22,2	**4,5**	17,6
COLLONGES	6,7	6,0	10,5	0,0	21,0	8,7	9,1	12,3	7,6	6,0	4,5	2,9	11,8	12,5	17,3
SEREZIN	23,1	25,6	22,3	**21,0**	0,0	28,9	13,7	14,2	**28,5**	19,5	**24,9**	**21,5**	22,7	18,9	**4,7**
ST GERMAIN	6,9	3,4	11,0	8,7	**28,9**	0,0	15,6	**20,9**	5,6	10,0	7,6	10,2	18,3	15,1	**24,8**
BATTIERE	9,4	12,2	9,0	9,1	13,7	15,6	0,0	12,6	16,5	5,8	13,6	11,0	17,3	7,1	9,3
BRON	18,0	18,3	20,2	12,3	14,2	20,9	12,6	0,0	18,0	15,4	14,3	10,9	8,5	19,5	13,3
MONTANAY	10,2	6,5	14,8	7,6	28,5	5,6	16,5	18,0	0,0	12,0	3,8	7,3	13,6	18,2	24,9
CHAMPAGNE	**3,6**	6,7	5,0	6,0	19,5	10,0	5,8	15,4	12,0	0,0	10,0	8,8	17,3	6,6	15,1
CAILLOUX	9,4	6,6	13,9	4,5	24,9	7,6	13,6	14,3	3,8	10,0	0,0	3,6	10,7	16,6	21,5
RILLIEUX	9,5	8,1	13,5	**2,9**	21,5	10,2	11,0	10,9	7,3	8,8	**3,6**	0,0	9,0	15,2	18,2
MEYZIEU	18,5	16,9	22,2	11,8	22,7	18,3	17,3	8,5	13,6	17,3	10,7	9,0	0,0	**23,2**	21,2
ST CONSORCE	8,3	12,2	**4,5**	12,5	18,9	15,1	7,1	19,5	18,2	6,6	16,6	**15,2**	23,2	0,0	14,2
ST GENIS	18,7	21,4	17,6	17,3	**4,7**	24,8	9,3	13,3	24,9	15,1	21,5	18,2	21,2	14,2	0,0

Tableau 2.6b : Distances (en km) entre les pluviomètres opérationnels du Grand Lyon (en rouge et en bleu respectivement les postes voisins les plus éloignés et les plus proches)

Ces tableaux nous informent qu'un pluviomètre se situe en moyenne à 13,2 km de tous les autres, mais surtout que la distance minimale moyenne entre deux postes est de 3,4 km (σ = 900m). La distance minimale la plus élevée entre deux postes est de 5,3 km (entre Meyzieu et Genas), et la plus réduite de 1,6 km (entre Rilleux et Crépieux). Ces caractéristiques en font un des réseaux les plus denses de France, parmi ceux des agglomérations de Paris (87 postes pour 58 000 km² environ - Emmanuel et al., 2009), de Marseille (25 postes pour 240 km² - Ramos-Domingues 2002), de Nancy (23 postes pour 160 km² - Faure, 2002 – Lefèvre, 2006) ou de Bordeaux (29 postes en temps réel pour 550 km² - Bourgogne, 2007).

1.3.4 Critique et validation des données

L'ensemble des pluviomètres sont situés en des sites dégagés ou principalement dégagés selon les normes de l'OMM, ou en classe 1 ou 2 d'après les recommandations de Météo-France.

Les données sont considérées comme fiables à partir de 1988 (Chocat et Bardin, 2002 ; Paturel et Chocat, 1994). Elles sont méticuleusement critiquées puis validées le jour suivant l'événement pluvieux par un technicien de la direction de l'eau. Les valeurs sont confrontées les unes aux autres, et les valeurs douteuses sont mises en évidence. A partir de 1990, un critère de qualité est affecté à tous les pas de temps de six minutes. Ce critère permet de connaître *a posteriori* l'objet de fonctionnement du pluviomètre :

- *0 : rien à signaler*
- *1 : défaut d'étalonnage détecté*
- *2 : décalage horloge*
- *3 : cônes bouchés*
- *4 : arrosages*
- *5 : absence de mesures*

Cette critique systématique a aussi été effectuée pour les données antérieures à 1990, afin d'identifier d'éventuelles intensités douteuses qui seraient passés inaperçues avant que la procédure ne soit appliquée aussi soigneusement qu'aujourd'hui (Chocat et Bardin, 2007). Ces données ainsi validées ont servi de base aux traitements réalisés dans la suite de cette thèse.

Météo-France dispose sur le site de Bron d'un pluviomètre de même type que celui du Grand Lyon. Des comparaisons de cumuls ont été effectuées pour différents pas de temps

(de l'heure à la journée), ou à l'échelle de l'épisode. La différence est nulle ou minime et n'excède en général jamais 0,4 mm (à cause des limites inhérentes à ce genre de pluviomètre précédemment mises en évidence). Pour des années complètes de fonctionnement des deux pluviomètres sans périodes de dysfonctionnement, la différence sur les cumuls annuels n'excède en général pas 20 mm (tableau 2.7 – Météo-France, 2010).

	Bron Grand Lyon	Bron Météo-France
1999	972,8	963,2
2001	823,2	825,8
2005	668,2	649,6

Tableau 2.7 : Exemples de cumuls annuels (en mm) sans dysfonctionnement pour les pluviomètres de Bron du Grand Lyon et de Météo-France

1.3.5 Autres sources de données exploitables dans l'agglomération

Il existe d'autres mesures pluviométriques effectuées sur le sol de l'agglomération. Nous avons vu que Météo-France possède un poste à Bron (poste 69029001, station professionnelle surveillée à transmission quotidienne). Six autres dispositifs de mesure sont situés dans l'agglomération (Limonest, Tête d'Or, Saint Rambert, Saint-Genis-Laval, Saint-Genis-Coin et Tassin mi-lune). Ces postes sont des stations bénévoles manuelles.

Le Cemagref de Lyon a récemment installé des pluviomètres à proximité de l'agglomération, sur le bassin versant de l'Yzeron, à une dizaine de kilomètres à l'ouest (sites de Pollionay en 2002 et Verdy en 2005).

Enfin, le Laboratoire de Climatologie Risque Environnement (LCRE) de l'UMR 5600 CNRS Environnement Ville Société possède depuis 2008 deux stations météorologiques multi-paramètres (pluviométrie, température, vent et humidité) sur le toit de l'Université Jean Moulin Lyon III, dans le septième arrondissement de Lyon.

Cependant, ces données ne seront pas utilisées par la suite dans cette étude en raison des degrés divers de fiabilité de la mesure, du site, du pas de temps d'intégration, de la longueur de la série, de la critique et de la validation de ces mesures.

Ces mesures de pluie directes au sol qui proviennent d'un réseau de pluviomètres sont ponctuelles. Elles sont avant tout une valeur indicative du volume de pluie recueilli en un

point spécifique. Pour des opérations d'aménagement, de gestion des eaux ou encore de prévention des risques, cette connaissance spatiale discrète des précipitations est insuffisante (Comby, 1998). Par exemple, en modélisation hydrologique, « l'incertitude qui résulte du choix du jeu de pluie ou de la méthode de répartition est plus forte que l'incertitude liée au choix du modèle hydrodynamique » (Paquier et al., 2009).

Ces valeurs pluviométriques nécessitent donc d'être interpolées dans l'espace afin de connaître avec précision la pluie surfacique (Laborde, 2009). Les méthodes d'interpolation spatiale sont nombreuses et d'une complexité comme d'une efficacité très variables (Nepel, 1997 ; Leblois et Bois, 2000 ; Ball et Luk, 1998). La sélection de l'une ou l'autre est logiquement conditionnée par la représentativité espérée des résultats que l'on obtiendra et les objectifs que l'on se fixe. Les études comparatives sur l'efficacité des méthodes d'interpolation ne sont pas nouvelles (Allard D., 2003 ; Atkinson et Lloyd, 1998). Cependant, aucune comparaison n'a été menée sur le territoire du Grand Lyon et sa forte densité de pluviomètres. La seconde moitié de cette partie sera donc consacrée à une évaluation des méthodes d'interpolation de la pluie sur le territoire du Grand Lyon.

2 La nécessité de l'interpolation spatiale des précipitations

L'interpolation spatiale permet d'estimer la valeur d'une variable en un site à partir des valeurs de la même variable mesurée en des points voisins (Zaninetti, 2005 ; Laurent, 2007 et 2008). Depuis le milieu du 20ème siècle, de très nombreuses méthodes ont été développées (Thiessen, 1911 ; Krige, 1951 ; Matheron, 1970). L'objectif de ce texte n'est donc pas de faire une présentation détaillée et exhaustive de chacune de ces méthodes. Cependant, avant de passer à l'évaluation des méthodes les plus fréquemment employées afin de déterminer la ou les plus adéquates sur le territoire du Grand Lyon, une description de chaque technique va être effectuée pour en saisir leurs fonctionnements respectifs.

2.1 Présentation des méthodes d'interpolation spatiale

2.1.1 Principes de base de l'interpolation spatiale et de la variable régionalisée

L'interpolation spatiale s'effectue sur un espace géographique appelé « champ » et noté *D*. Sur ce champ se déploie continûment un phénomène pluvieux, dont la quantification est précisément connue en quelques points seulement, à l'aide de pluviomètres dans notre cas présent. Cette mesure est appelée « variable régionalisée » et est vue comme une fonction numérique définie sur ce champ *D* qui est notée $\{z(s), s \in D\}$. *s* représente un point du champ *D* identifié par ses coordonnées géographiques *x* et *y*. En un point particulier s_i du champ *D*, la valeur de cette fonction porte le nom de valeur régionalisée et est notée $z(s_i)$ (Baillargeon, 2005 ; Wackernagel, 2003).

Les sites d'observations qui disposent d'un dispositif de mesure et où est connue la pluviosité sont notés s_i avec $i = 1, \ldots, n$. Le but de l'interpolation spatiale est donc d'informer de la valeur d'une variable régionalisée en un site s_0 du champ *D*, autre qu'un des sites de mesure où la valeur de précipitation est connue. Il s'agit alors de l'estimation de la valeur d'une variable régionalisée en un endroit de *D* où elle n'a pas été quantifiée, à partir des valeurs régionalisés observées $z(s_1)$ à $z(s_n)$. La valeur estimée en s_0 sera notée $\hat{z}(s_0)$ (Cressie, 1993 ; Arnaud et Emery, 2000 ; Baillargeon, 2005 ; Zaninetti, 2005).

Les techniques d'interpolation spatiale sont en général divisées en deux catégories : les méthodes déterministes, et les méthodes stochastiques (bien que d'autres auteurs comme L. Neppel (1997) aient proposé d'autres classifications). Les méthodes déterministes s'appuient uniquement sur la variable régionalisée, et aucune notion probabiliste n'intervient dans la définition de cette variable. Les méthodes stochastiques prennent en compte un deuxième niveau d'abstraction dans la modélisation du phénomène pluvieux. La variable régionalisée est identifiée comme une réalisation d'une fonction aléatoire $\{Z(s), s \in D\}$. Cette fonction est aussi dénommée processus stochastique. Ainsi, toute valeur régionalisée $z(s_i)$ est envisagée comme une réalisation d'une variable aléatoire $Z(s_i)$.

2.1.2 Les méthodes déterministes

Il est généralement distingué trois types de méthodes d'interpolation spatiale déterministes. Les techniques par partitionnement de l'espace, les techniques barycentriques et les *splines*.

- *Méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace*

Les méthodes d'interpolation par partitionnement de l'espace reposent sur l'utilisation d'un partitionnement du territoire d'étude. Elles déterminent le poids des observations mais surtout leur voisinage. Le type de partitionnement du terrain le plus employé en climatologie et en hydrologie est le découpage en régions distinctes par polygones.

C'est en 1911 que Thiessen a proposé cette méthode d'interpolation spatiale qui porte désormais son nom (Thiessen, 1911). Cette technique repose sur la loi du plus proche voisin. On affecte à chacune des observations des pluviomètres un polygone d'influence, construit de telle sorte que chaque point du polygone est plus proche de son site d'observation que de tout autre site. Les polygones s'obtiennent en traçant les médiatrices des segments reliant les sites d'observation. Le terrain d'étude est alors partitionné en polygones convexes, encore désignés par les termes « cellules de Dirichlet » ou « diagramme de Voronoï » (figure 2.22). La zone d'étude présentera des polygones de petite surface pour les données groupées, au contraire des données isolées qui produiront des polygones de grande superficie (Arnaud et Emery, 2000).

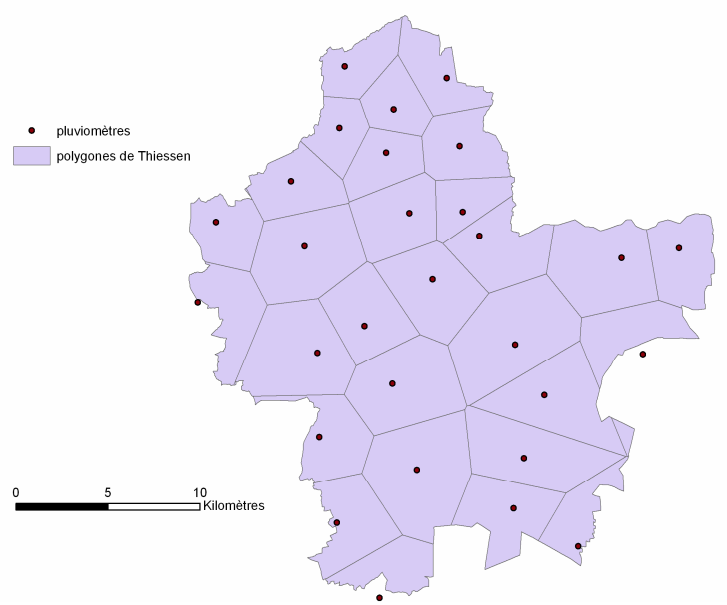


Figure 2.22 : Polygones de Thiessen fondés sur l'ensemble des pluviomètres opérationnels du Grand Lyon

On admet que la hauteur de pluie à chaque point sans mesure est égale à la hauteur du poste le plus proche (Nepel, 1997). Il est à noter que le découpage en polygones dépend uniquement de la répartition spatiale des sites d'observations, car pour une autre série de données issue du même réseau de pluviomètres, le même partitionnement serait obtenu, mais il présenterait des valeurs différentes de hauteur de pluie. Si la densité des points d'échantillonnage est élevée, la représentativité peut être relativement correcte, mais si elle est faible, la représentativité sera très décevante par rapport à la réalité du phénomène (Comby, 1998 ; Laborde, 2009). En effet, l'interpolation par la méthode des polygones de Thiessen (et les méthodes par partitionnement de l'espace en général) ne prend en compte que les sites d'observations voisins pour estimer une valeur non mesurée. C'est pourquoi cette méthode est qualifiée de méthode locale. En conséquence, elle se prive d'une grande quantité d'information disponible. En outre, les méthodes par partitionnement de l'espace sont exactes. Cela signifie que les estimations fournies aux points d'observation sont égales aux observations.

Pour exemple représentatif, les cumuls de l'année 1988 et du 29 juin 1993 (3ème épisode le plus intense en 18 minutes de la période 1988 – 2005) sont représentés en figures 2.23 et 2.24 à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen. Ces deux cumuls ont été choisis pour leur dissemblance et serviront d'exemples pour les différentes méthodes d'interpolation spatiale testées ici. Le premier a une hauteur d'eau considérable avec un faible gradient, à la différence du deuxième cumul, épisode localisé avec une très forte disparité spatiale.

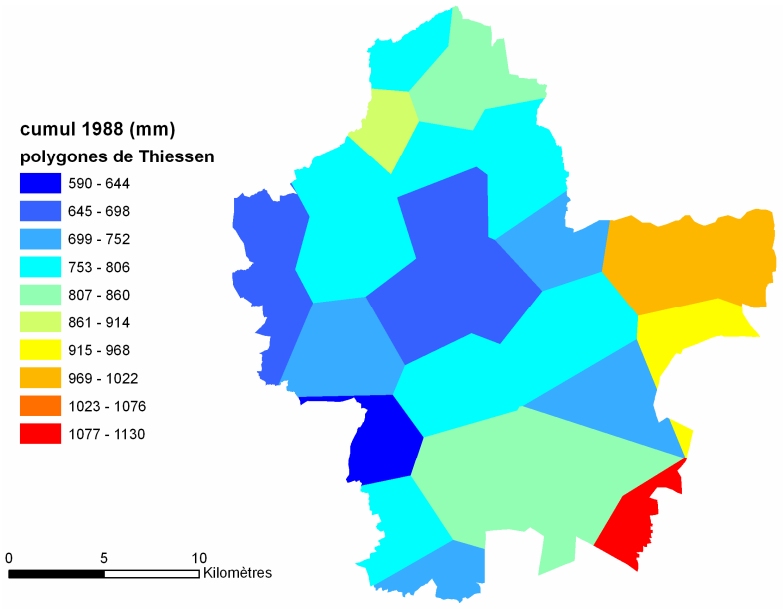


Figure 2.23 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé avec la méthode des polygones de Thiessen

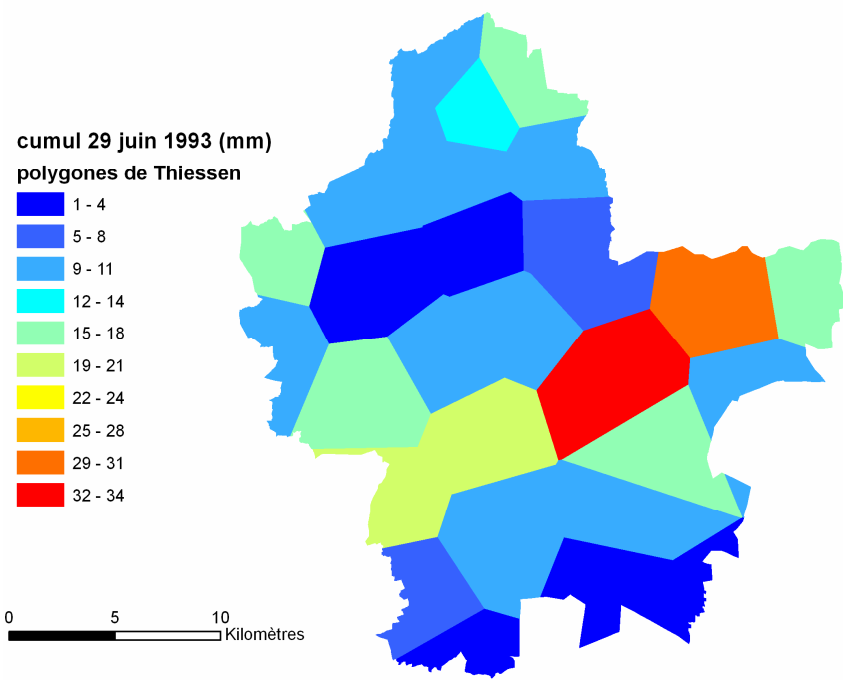


Figure 2.24 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 29 juin 1993 interpolé avec la méthode des polygones de Thiessen

- *Méthodes barycentriques*

Les méthodes barycentriques estiment la valeur d'une variable régionalisée en un point non échantillonné par une moyenne pondérée des valeurs régionalisées connues aux points d'observation de la sorte :

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i z(s_i) \text{ avec } \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = 1$$

Pour que les valeurs estimées ne présentent pas de biais par rapport aux valeurs observées, la somme des poids λ_i se doit d'être égale à 1.

La méthode de l'inverse des distances est la méthode barycentrique la plus employée. Elle attribue à chaque pluviomètre une pondération inversement proportionnelle à la distance *d* entre celui-ci et le point à estimer. Ainsi, l'estimation en un point s_0 non mesuré s'exprime de la sorte :

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i \in V(s_0)} \frac{1/|s_i - s_0|^d}{\sum_{i \in V(s_0)} 1/|s_i - s_0|^d} z(s_i) \text{ , } d > 0$$

La surface calculée par interpolation passe par les points d'observation. Cependant, cette méthode présente de nombreux inconvénients. Par exemple, elle ne tient pas compte

de la position relative des points d'observations entre eux, mais uniquement de la distance entre le pluviomètre et le point à estimer. En outre, elle fournit des cartes d'interpolation en « œil de bœuf » (*bull's eye* - Arnaud et Emery, 2000) ou en « trous et bosses » (Laborde, 2004), c'est-à-dire des isohyètes de forme plus ou moins concentriques centrées sur les pluviomètres. En outre, les valeurs interpolées sont toujours comprises entre les valeurs minimales et les valeurs maximales pluviométriques. Cela peut s'avérer être un désavantage lorsque le réseau ne fournit pas de points de mesure situés aux limites du domaine d'observation pris en considération, et favoriser les « effets de bords ». Cependant, nous avons vu que le réseau de mesure au sol de la communauté urbaine de Lyon était favorablement réparti afin de pallier ce genre de biais. On notera pour finir que les méthodes barycentriques sont exactes.

Pour exemple représentatif, les cumuls de l'année 1988 et de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993 ont été spatialisés à l'aide de la méthode de l'inverse de la distance (figures 2.25 et 2.26).

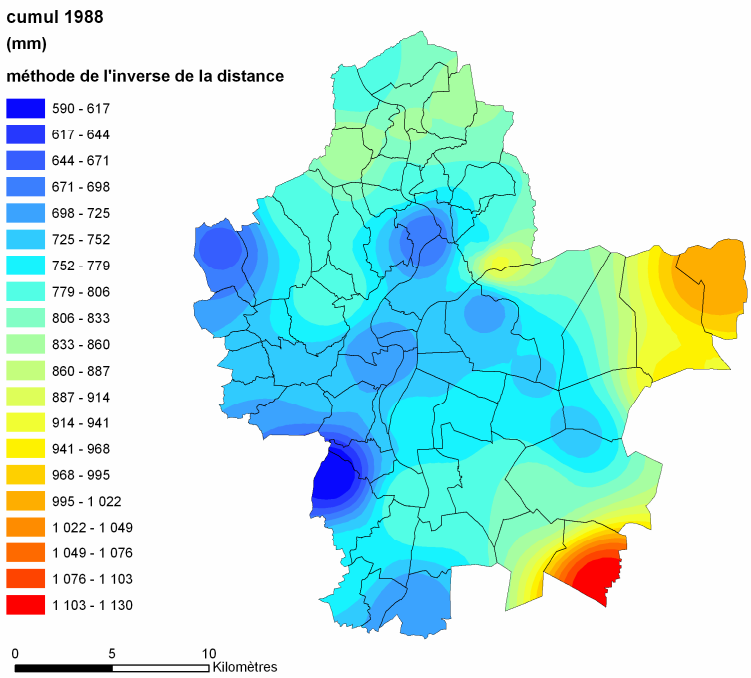


Figure 2.25 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé avec la méthode de l'inverse de la distance

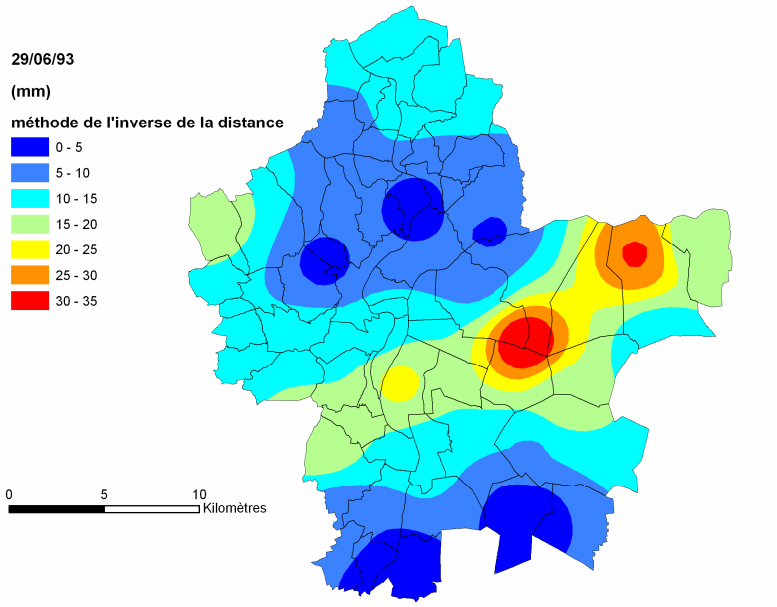


Figure 2.26 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 29 juin 1993 interpolé avec la méthode de l'inverse de la distance

- *Splines*

Une *spline* est une règle souple utilisée en dessin et en cartographie afin de tracer des courbes lisses passant par des points préalablement positionnés. En mathématiques, *spline* est une famille de fonctions régulières minimisant l'énergie de flexion sous des contraintes d'ajustement à des données ponctuelles. Deux catégories de fonctions *splines* peuvent être identifiées. La première regroupe les *splines* d'interpolation qui passent exactement par les valeurs observées aux pluviomètres et fournissent ainsi une interpolation exacte, et les *splines* de lissage qui passent aux environs de ceux-ci, à utiliser quand les valeurs pluviométriques sont connues avec une certaine imprécision (interpolation inexacte) (Myers, 1994 ; Mitasova et Mitas, 1993 ; Hutchinson, 2003a et 2003b). Pour ces différentes raisons, seules les *splines* d'interpolation seront utilisées dans ce travail.

A la différence des méthodes barycentriques, ce type d'interpolation ne s'effectue pas point par point mais suggère plutôt d'ajuster une surface sur tout le champ *D*. La spline d'interpolation est une fonction $\hat{z}$ de la forme suivante :

$$\hat{z}(s) = \hat{z}(x, y) = a_0 + a_1 x + a_2 y + \sum_{i=1}^{n} b_i e(s, s_i) \text{ , } s \in D$$

Avec $e(s, s_i) = |s_i - s_0|^2 \ ln \ (|s_i - s_0|)$, qui minimise l'énergie de flexion (Baillargeon, 2005).

Pour exemple représentatif, les cumuls de l'année 1988 et du 29 juin 1993 sont représentés en figures 2.27 et 2.28 à l'aide de *splines* d'interpolation.

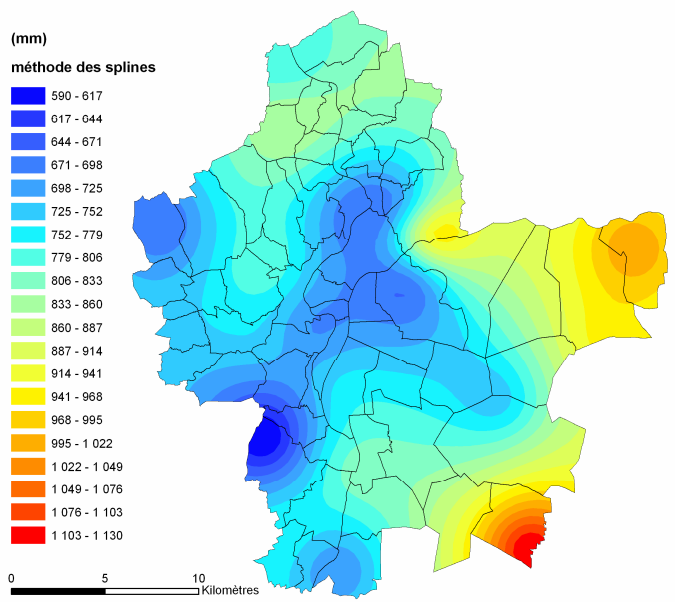


Figure 2.27 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 spatialisé par splines d'interpolation

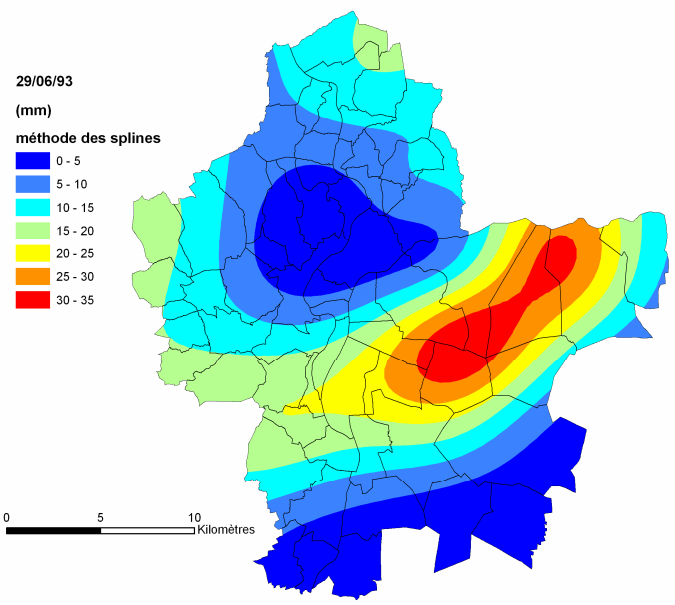


Figure 2.28 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 spatialisé par splines d'interpolation

2.1.3 Les méthodes stochastiques

Nous avons vu qu'à la différence des méthodes déterministes qui ne considèrent que la variable régionalisée sans notion probabiliste, les méthodes stochastiques prennent en compte la variable régionalisée comme une réalisation d'une fonction aléatoire {$Z(s)$, $s \in D$}. Les techniques stochastiques rassemblent les techniques de régression classique, de régression locale et de krigeage.

- *Méthodes de régression classique*

L'interpolation par régression classique (ou globale) est une méthode stochastique (que certains auteurs comme Arnaud et Emery (2000) considèrent cependant comme déterministe), qui suppose que la variable régionalisée étudiée est une fonction aléatoire de la forme :

$$Z(s) = \mu(s) + \varepsilon(s) \text{ , } s \in D$$

Avec $\mu(.)$: structure déterministe pour l'espérance de Z(.), dépendant de la localisation des observations

Et $\varepsilon(.)$: fonction aléatoire normale d'espérance nulle, de variance homogène et qui ne présente pas de structure de dépendance spatiale.

Cette interpolation consiste à ajuster une surface aux données pluviométriques observées où $\mu(s)$ a pour équation un polynôme de degré généralement inférieur ou égal à trois de la sorte :

$$\mu(s) = \mu(x,y) = \sum_{l+k \le d} \beta_{lk} x^l y^k$$

Cette surface est ajustée aux valeurs pluviométriques relevées, avec la méthode des moindres carrés par exemple, ou encore celle du maximum de vraisemblance (Baillargeon, 2005). Cette méthode s'apparente à une technique de lissage spatial qui élimine les variations locales pour retenir une surface plutôt lisse qui rend compte au mieux de la variabilité spatiale globale de la distribution pluvieuse. C'est pourquoi ce modèle de régression est fréquemment appelé « surface de tendance » (*trend surface*). L'interpolation par régression classique est approximative et globale, car la surface interpolée fournie aux points d'observation n'est pas toujours égale aux observations. En outre, et à la différence de l'interpolation par régression locale, tous les sites d'observation, même ceux éloignés, influencent avec le même poids l'estimation en n'importe quel point de la zone d'étude. Cette technique est efficace quand le champ varie lentement (Arnaud et Emery, 2000 ; Waniez,

2003). Pour exemple représentatif, les cumuls de l'année 1988 et du 29 juin 1993 sont représentés en figures 2.29 et 2.30 à l'aide d'interpolation par régression classique.

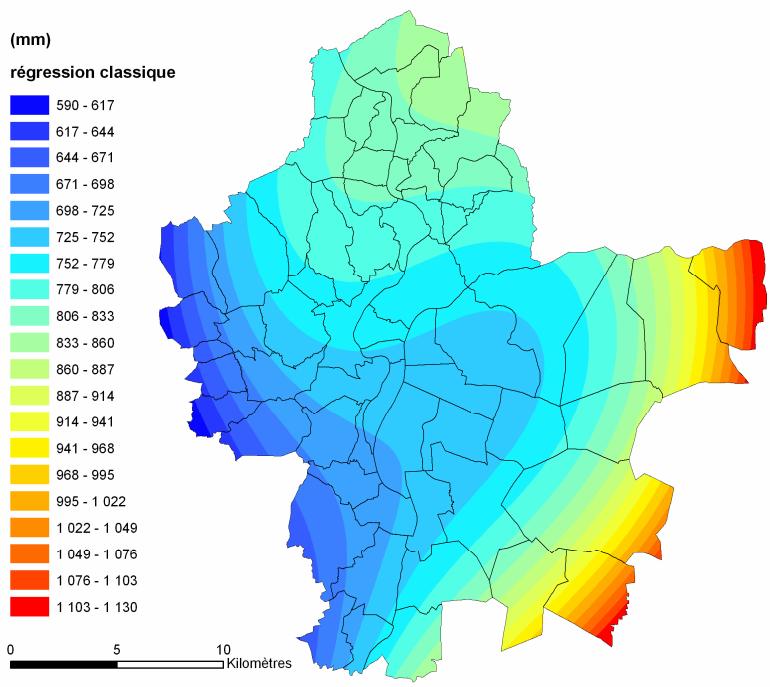


Figure 2.29 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé par régression classique

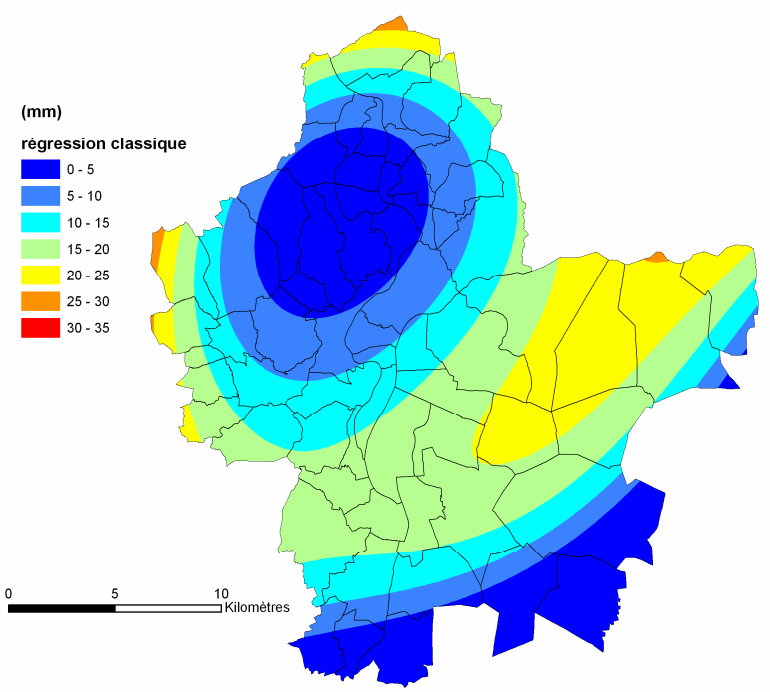


Figure 2.30 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par régression classique

- *Méthodes de régression locale*

Nous avons vu qu'en régression classique, tous les sites d'observations, même ceux qui sont éloignés, influençaient avec le même poids l'estimation en n'importe quel point de la zone d'étude. Une extension de cette méthode permet de diminuer l'impact des points d'observation s_0 éloignés du point à estimer. Ce type de méthode est couramment appelé « régression locale » (Joly et al. 2009 ; Joly et al, 2008 ; Cleveland et Devlin, 1988). Cependant, d'autres auteurs l'ont parfois appelé « régression pondérée géographiquement » comme Fotheringham et al. (2002), ou « régression kernel » comme Wand et Jones (1995).

Cette technique a le même fondement que la régression globale, sauf que $\mu(.)$ n'est maintenant plus estimée par un polynôme mais par une méthode locale d'estimation comme la méthode du maximum de vraisemblance pondérée ou la méthode des moindres carrés pondérés. Par cette méthode, la surface estimée en un point s_0 minimise :

$$\sum_{i=1}^{n} \lambda_i(s_0)[\hat{z}(s_i)\big|_{s0} - z(s_i)]^2$$

Avec $\hat{z}(s_i)\big|_{s0}$: valeur estimée de z(.) au point d'observation s_i à partir de la surface ajustée en s_0

$z(s_i)$: valeur régionalisée observée en s_i.

Ainsi, le poids de l'observation λ_i au point s_i prend la forme suivante :

$$\lambda_i(s_0) = K\left(\frac{|s_0 - s_i|}{h(s_0)}\right)$$

Avec *K*(.) : fonction de poids,

$|s_0 - s_i|$: distance euclidienne entre le poids d'estimation s_0 et le point d'observation s_i

h (.) : taille du voisinage.

Ce dernier paramètre est généralement spécifié en choisissant dans un premier temps la part α des points d'observation s_i à inclure dans l'ajustement du modèle. Ensuite, on ajuste $h(s_0)$ en fonction de ces points d'observation. De ce fait, plus une valeur régionalisée a été mesurée loin du point à estimer, moins celle-ci a d'influence, jusqu'à une certaine distance où elle n'aura plus d'impact du tout, en fonction de la taille de voisinage adopté.

Pour exemple représentatif, les cumuls de l'année 1988 et du 29 juin 1993 sont représentés en figures 2.31 et 2.32 à l'aide d'interpolation par régression locale.

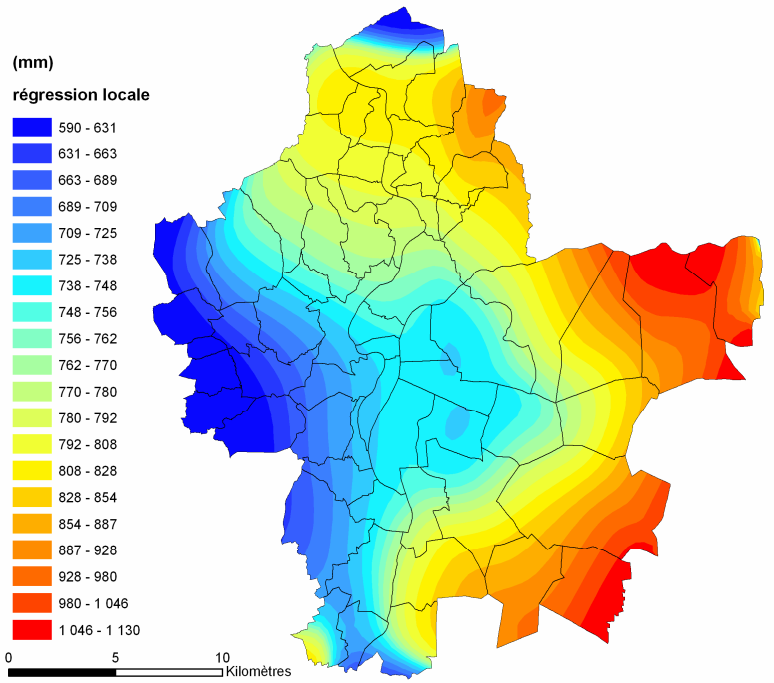


Figure 2.31 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé par régression locale

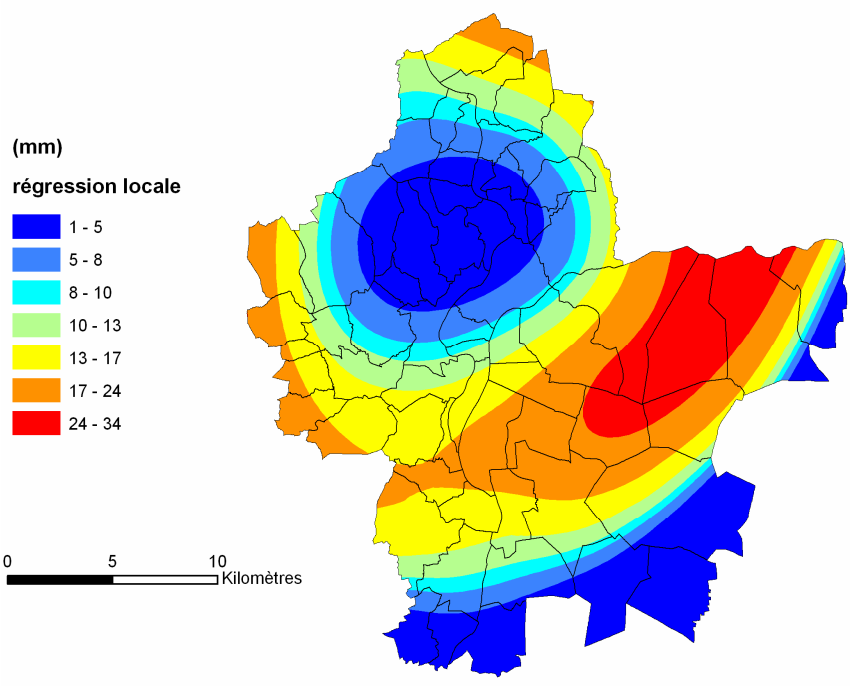


Figure 2.32 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par régression locale

- *Méthodes de krigeage*

Le krigeage est une méthode d'interpolation spatiale stochastique qui tient compte à la fois de la configuration géométrique des points observés et de la structure de dépendance spatiale des données, à la différence des interpolations par régression. Il a été initié par l'ingénieur minier sud-africain Krige (1951) d'où la méthode tire son nom, puis formalisé par Matheron (1963), et par le météorologue Gandin (1963).

Le principe du krigeage est de permettre l'estimation de la valeur de la variable régionalisée étudiée en un site non observé s_0 par une combinaison linéaire de données ponctuelles adjacentes de la forme :

$$\hat{z}(s_\circ) = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i Z(s_i)$$

Une estimation non biaisée et de variance minimale est obtenue en associant à chacune des variables régionalisées observées un poids λ_i qui dépend de la localisation des observations et de leur structure de dépendance spatiale.

Il existe une condition *sine qua non* quant à l'utilisation de la méthode du krigeage. En effet, il est nécessaire que la moyenne et la variance de la fonction aléatoire soient stationnaires. Cela signifie que la moyenne et la variance ne dépendent pas de la position des points, seulement de la distance entre les points (Gratton, 2002). « Au sens strict, la stationnarité signifie que la loi de probabilité de la fonction aléatoire est invariante par translation, c'est-à-dire qu'elle ne dépend pas de l'origine du champ » (Baillargeon, 2005).

La forme générale du krigeage suit la même forme que la régression classique ou locale, à la différence que les erreurs sont maintenant supposées dépendantes spatialement (Szolgay et al., 2009). Ainsi, son expression est de la forme :

$Z(s) = \mu(s) + \delta(s)$, s ∈ *D*

Avec : μ (.) : structure déterministe pour l'espérance de *Z*(.)

δ (.) : fonction aléatoire stationnaire, d'espérance nulle et de structure de dépendance connue.

La forme de la tendance $\mu(.)$ détermine le type de krigeage effectué. Les trois types classiquement reconnus de krigeage sont les suivants :

- *Krigeage simple :* $\mu(s) = m$ *est une constante connue*
- *Krigeage ordinaire :* $\mu(s) = \mu$ *est une constante inconnue*

- *Krigeage universel :* $\mu(s) = \sum_{j=0}^{p} f_j(s)\beta_j$ *, combinaison linéaire de fonctions de la position s, c'est-à-dire qui contient une tendance*

Lorsque l'on a pour objectif d'interpoler spatialement des mesures pluviométriques, c'est généralement le krigeage ordinaire qui est employé car il présente peu de contraintes sur le plan de l'échantillonnage, ni sur la dépendance des données (Nepel, 1997 ; Ramos-Dominguez, 2002 ; Berthelot, 2008 ; Drapeau, 2000).

Ensuite, la fonction aléatoire $\delta(.)$ possède une structure de dépendance qui se doit d'être précisée. En pratique, elle n'est jamais connue préalablement. Elle est déterminée grâce à l' « analyse variographique », aussi appelée « analyse structurale » ou « variographie ». Le variogramme est la variance totale moins la covariance, en fonction de la distance entre les points (Gratton, 2002). Il quantifie le degré de ressemblance ou dissemblance entre les valeurs observées en deux sites suivant la distance qui les sépare (Lhotellier, 2005 et 2006).

Le krigeage a recours au semi variogramme $\gamma(.)$ pour déterminer les poids λ_i de la formule générale. Pour les n(*h*) points x_i et y_i séparés par une distance $h = (x_h - y_h)$:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i)^2$$

Pour rappel, la norme euclidienne d'un vecteur *h* est $|h| = \sqrt{(x_h^2 + y_h^2)}$

La figure 2.33 présente un exemple de variogramme expérimental : les points sont obtenus à l'aide de la formule ci-dessus pour l'ensemble des distances h possibles, où $h = |x_i - y_i|$.

Figure 2.33 : Exemple schématique de semi variogramme expérimental

Plusieurs auteurs dont Arnaud et Emery (2000) ou Zaninetti (2005) estiment que le semi-variogramme expérimental n'est pas valable pour de trop grandes distances *h* et préconisent de calculer le semi-variogramme uniquement pour les distances inférieures à la moitié de la distance maximale entre deux points d'observation. En outre, cela rend les temps de calcul moins longs, ce qui est toujours utile lorsque de nombreuses interpolations sont à effectuer.

Il est ensuite nécessaire d'ajuster une fonction analytique aux points issus du variogramme à l'aide de la méthode des moindres carrés pour obtenir une fonction continue qui caractérise totalement la semi variance en fonction de la distance *h* entre les points x_i et y_i.

« Le choix et l'ajustement d'une fonction au semi variogramme est la partie la plus délicate du Krigeage : c'est presque un art plutôt qu'une science » (Gratton, 2002). Il existe différents types modèles afin de modéliser le semi-varigramme : notamment linéaire avec palier, sphérique, exponentiel, circulaire ou gaussien (figure 2.34).

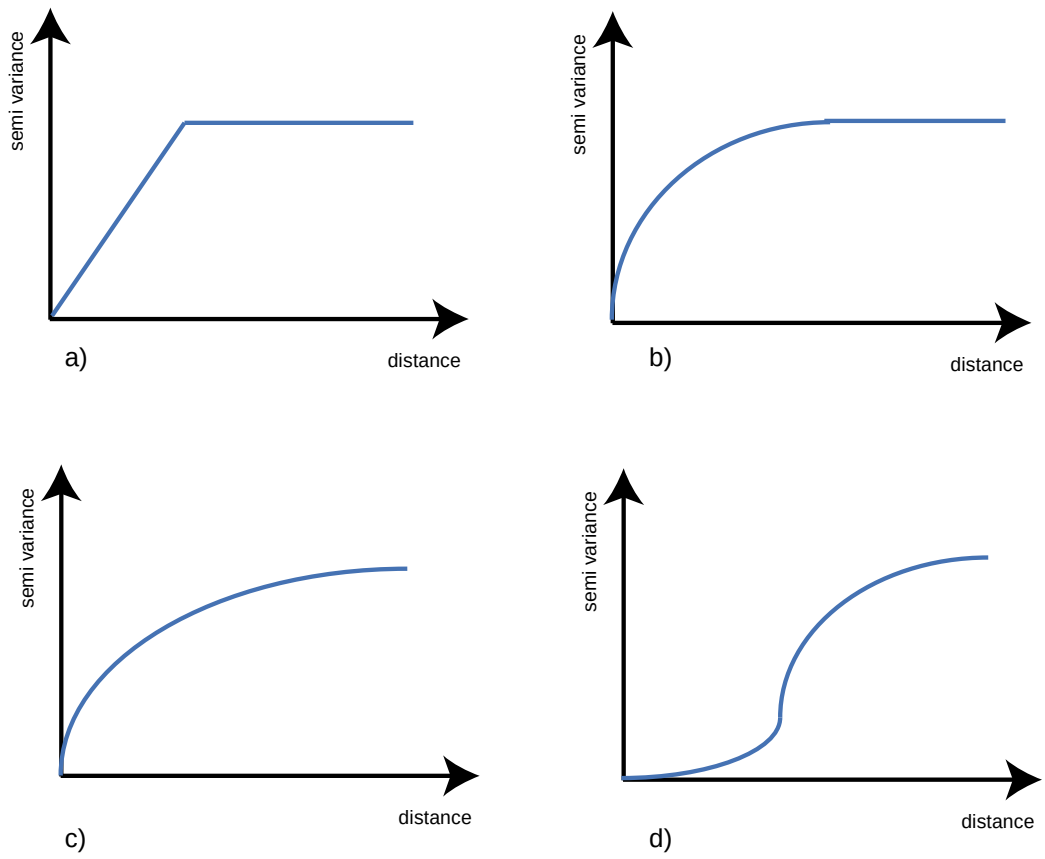


Figure 2.34 : Exemples schématiques de modèles de semi variogrammes parmi les plus courants. a) modèle linéaire avec palier ; b) modèle sphérique ; c) modèle exponentiel ; d) modèle gaussien

Trois paramètres du variogramme nous renseignent sur la nature, la structuration et la dépendance spatiale des variables aléatoires : il s'agit de la portée, du palier (ou du seuil) et de l'effet de pépite (respectivement *range*, *sill* et *nugget* en anglais) (figure 2.35).

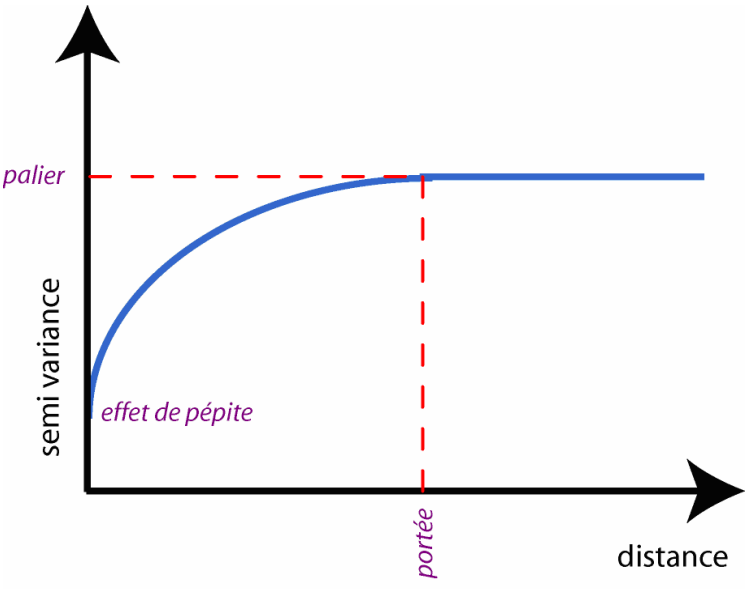


Figure 2.35 : Exemple schématique de semi variogramme sphérique avec les trois paramètres fondamentaux : la portée, le palier et l'effet de pépite

Lorsque la distance entre les points |*h*| augmente, le semi variogramme atteint généralement un plateau. L'atteinte d'un tel plateau signifie qu'à partir d'une certaine distance, il n'y a plus de dépendance spatiale entre les données, que l'auto-corrélation spatiale n'est plus significative entre les différents points de mesure. Cette distance s'appelle la « portée ». La variance à laquelle le plateau apparaît s'appelle le « palier ».

L'ordonnée à l'origine d'un semi variogramme est en général égale à 0. Cependant, il arrive que celle-ci soit supérieure à 0 (comme sur la figure 2.35). Cette configuration s'appelle l'effet de « pépite » et manifeste une faible ressemblance entre les valeurs régionalisées très voisines, conséquence directe le plus souvent de micro erreurs de mesure ou de l'existence de structures d'échelle plus fines que celles de l'échantillon (Lhotellier, 2005 et 2007).

Pour exemple représentatif, les cumuls de l'année 1988 et du 29 juin 1993 sont représentés en figures 2.36 et 2.37 à l'aide d'interpolation par krigeage ordinaire. L'ajustement d'un modèle théorique au variogramme a été effectué en privilégiant la qualité de l'ajustement aux petites interdistances (inférieures à la portée), qui constituent la partie utile du variogramme (Nepel, 1997). Le modèle sphérique est celui qui s'est le mieux ajusté, quels que soient les cas, et sera le modèle utilisé dans le reste de ce travail pour les

interpolations par krigeage ordinaire, comme le montre le variogramme de l'épisode du 07 septembre 1995 (figure 2.38).

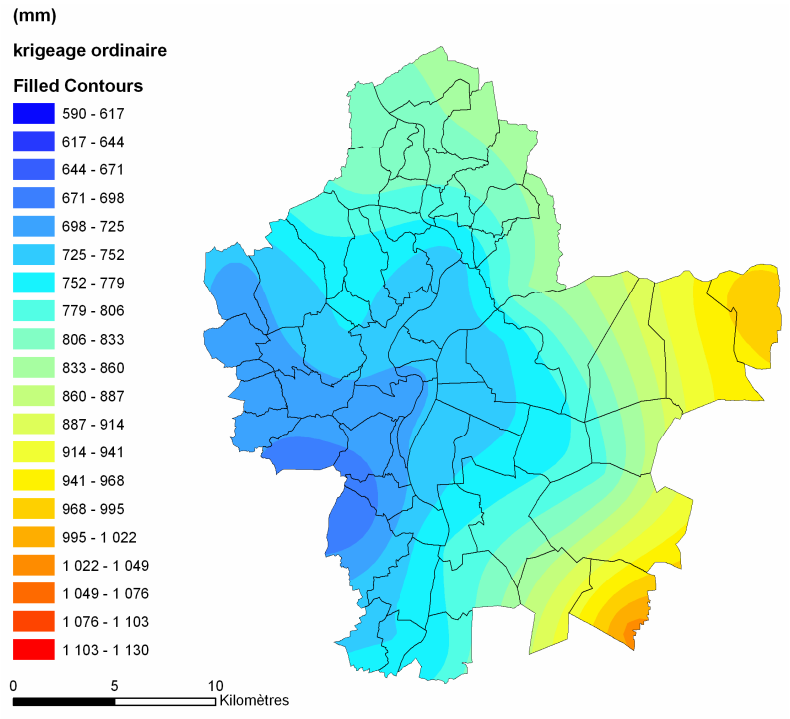


Figure 2.36 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé par krigeage ordinaire

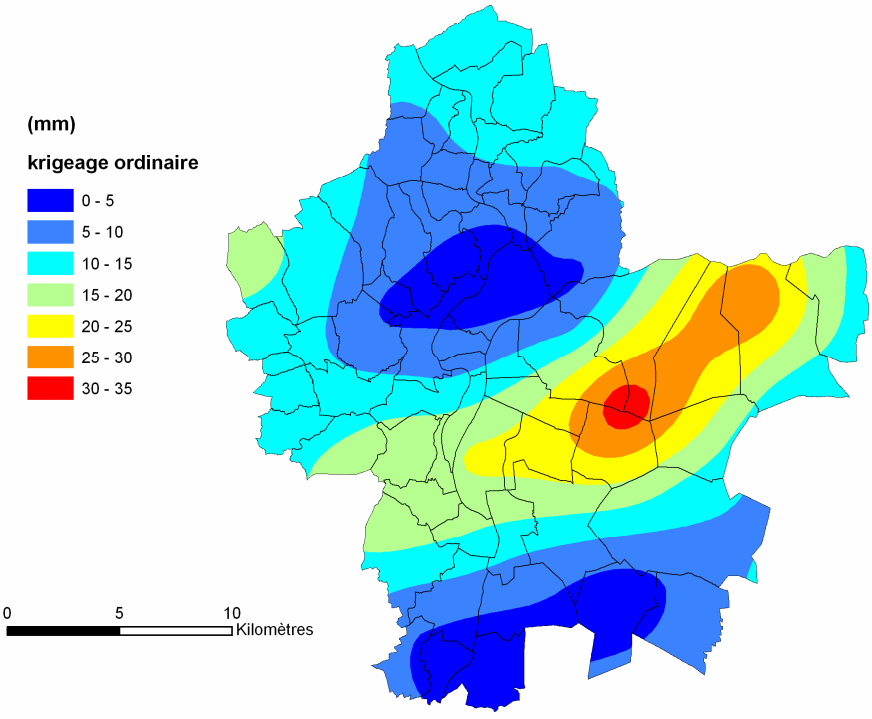


Figure 2.37 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par krigeage ordinaire

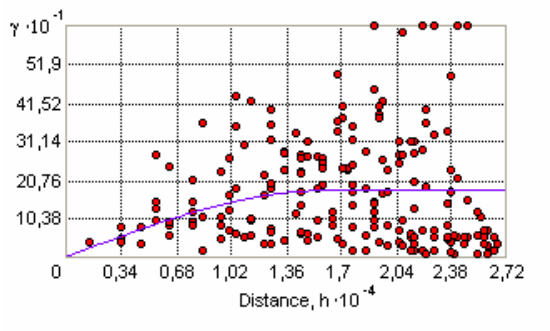


Figure 2.38 : Variogramme expérimental du cumul pluviométrique du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique

D'après la bibliographie, Le krigeage serait donc la méthode optimale d'interpolation (Gratton, 2002). Il peut être global ou local, en fonction du voisinage choisi et du nombre de pluviomètres à prendre en compte pour chacun des points à estimer, et est exact car il restitue les valeurs régionalisées mesurées aux sites d'observation (Baillargeon, 2005 ; Arnaud et Emery, 2000 ; Zaninetti, 2005).

Un autre avantage de cette méthode, contrairement aux autres techniques fréquemment employées et succinctement présentées ci-dessus, est la possibilité de calculer spatialement l'erreur d'estimation. Un exemple en est donné pour l'épisode du 29 juin 1993 en figure 2.39. Les plus fortes valeurs d'erreur sont un indicateur de localisation des zones sous échantillonnées (Peraudin, 2003). Ainsi, plus l'on se rapproche des pluviomètres, plus l'erreur est faible, et inversement lorsque l'on s'en éloigne (Laborde, 2004).

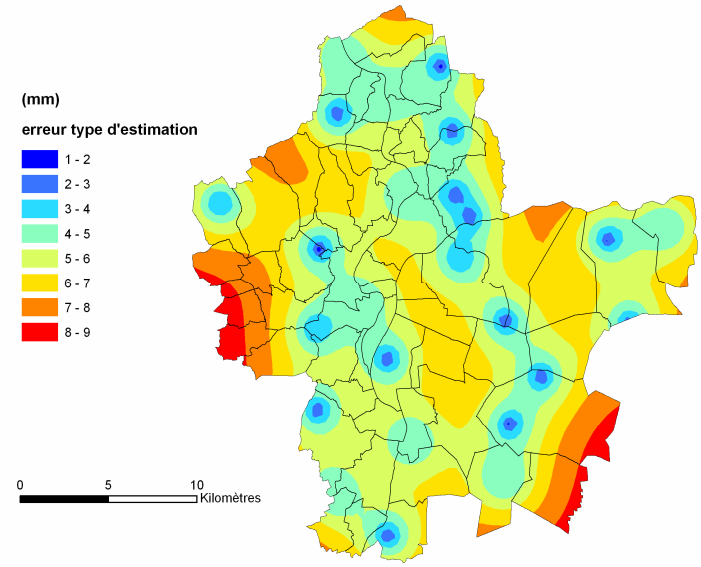


Figure 2.39 : Erreurs types d'estimation pour le cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par krigeage ordinaire

2.1.4 Les autres méthodes

Les paragraphes précédents avaient pour objectif de présenter les méthodes d'interpolation spatiale les plus fréquemment employées. Il en existe bien d'autres, comme les méthodes de Sibson, d'Akima, de Shepard, des facettes planes, etc. D'après certains auteurs, les faiblesses du krigeage telles que sa sensibilité aux valeurs extrêmes ou ses conditions strictes d'utilisation ont conduit au développement de méthodes bayésiennes (Gaudart et al., 1999 ; Banerjee et al., 2004), et des réseaux neuronaux artificiels (Bryan et Adams, 2002 ; Rigol et al., 2001 ; Michaelides et al., 2001). Cependant, ces derniers souffrent du temps considérable consacré à la phase d'apprentissage et à la difficile interprétation des résultats par le logiciel utilisé. En conséquence, l'analyse des résultats s'avère très peu aisée (Lhotellier, 2005).

De la même manière, il est possible d'approfondir chacune de ces méthodes, notamment le krigeage (en s'intéressant aux résidus – Laborde et al., 2007), la régression locale ou les splines, mais la décision d'y consacrer du temps n'était, dans notre cas, pas un choix très judicieux, étant donné la possibilité ultérieure d'utiliser le radar météorologique local. Cet outil fournit une donnée continue qui ne nécessite donc pas d'être interpolée. Il en ressort néanmoins que les différentes méthodes d'interpolation spatiale ne fournissent pas les mêmes résultats sur le territoire du Grand Lyon, nous l'avons vu avec les différents exemples précédemment exposés. Certaines semblent plus représentatives que d'autres (figure 2.40). De la même manière, l'utilisation d'une méthode ou d'une autre afin de spatialiser la pluie en entrée de modèle hydrologique peut fortement influencer les résultats des simulations, notamment les débits et les volumes à l'exutoire. Il est donc nécessaire de procéder maintenant à un test de ces méthodes sur le territoire du Grand Lyon, dans le cas de figure où seules les données pluviométriques du réseau de mesure au sol seraient disponibles. Toutes les méthodes précédemment décrites vont être testées, à l'exception de la méthode d'interpolation par polygones de Thiessen qui fournit des résultats beaucoup trop sommaires et simplifiés, et qui à la base était destinée à être utilisée sur de larges aires d'étude (Thiessen, 1911).

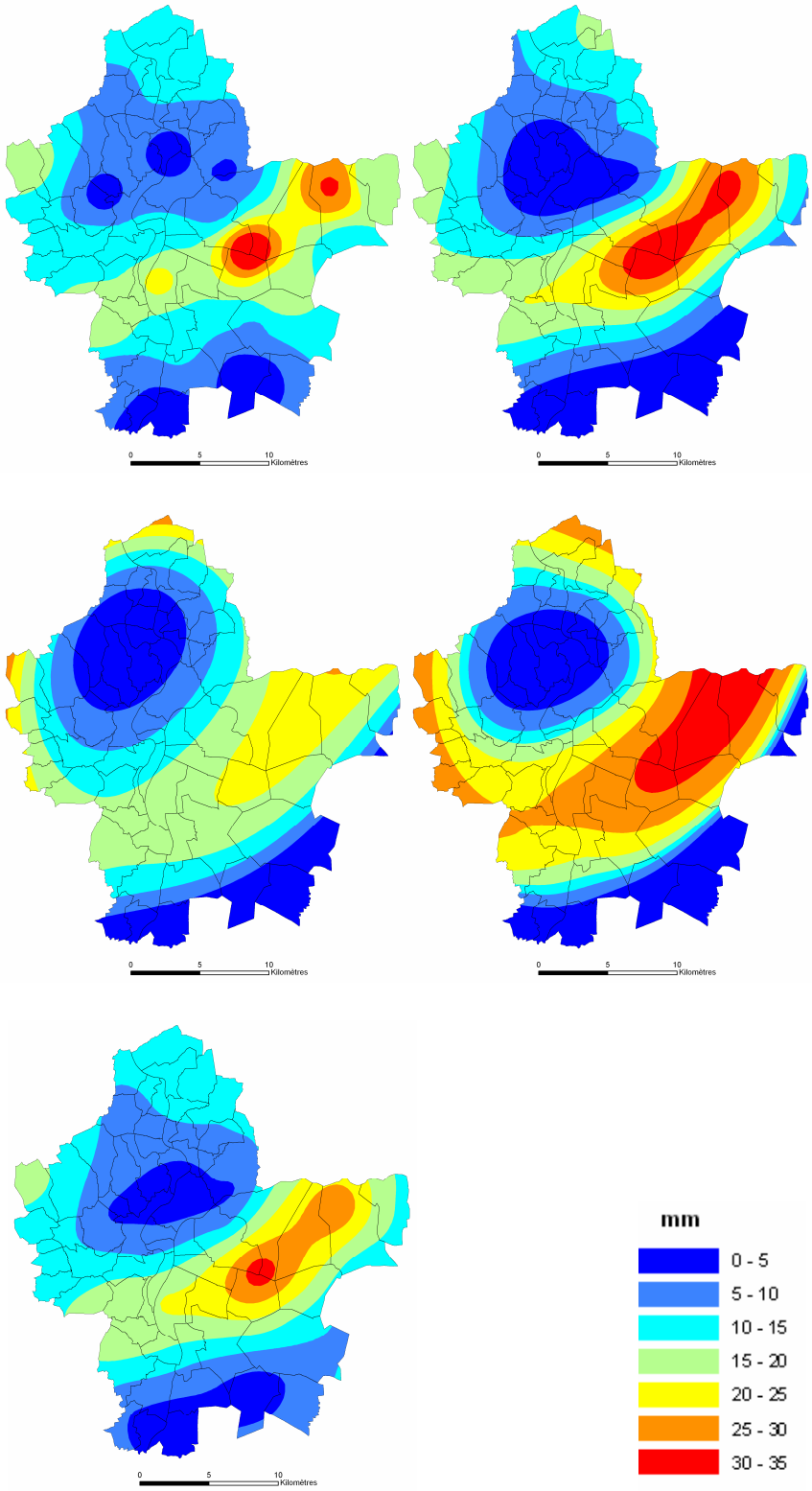


Figure 2.40 : Spatialisation du cumul pluviométrique du 29 juin 1993 estimé par les cinq méthodes d'interpolation spatiale retenues pour l'évaluation. Respectivement de gauche à droite et de haut en bas : inverse des distances, splines d'interpolation, régression classique, régression locale et krigeage ordinaire

2.2 Evaluation des méthodes d'interpolation spatiale sur le Grand Lyon

Il ressort de l'étude bibliographique que le krigeage génèrerait les interpolations spatiales les plus justes. Cependant, le but de cette partie est de tester cette affirmation et d'évaluer les méthodes d'interpolation spatiale retenues afin de choisir la plus efficace quant à la représentation de la distribution spatio-temporelle de la pluie. En effet, parmi toutes ces méthodes, y en a-t-il une qui donnerait globalement de meilleurs résultats lors de l'estimation de la pluviométrie, c'est à dire une méthode dont la distance entre le champ de pluie observé et le champ estimé est la plus faible ? Ainsi, les cinq méthodes retenues vont maintenant être évaluées sur le territoire du Grand Lyon, à partir de trois échantillons de pluie. Il s'agit des méthodes de l'inverse des distances et des splines d'interpolation pour les méthodes déterministes, et pour les méthodes stochastiques des régressions classiques, locales et du krigeage ordinaire.

2.2.1 Trois échantillons de pluies analysés

L'évaluation des méthodes d'interpolation spatiale porte sur la réalisation de cartes fondées sur les hauteurs d'eau précipitées issues des pluviomètres du Grand Lyon. Afin d'avoir un ensemble de résultats représentatifs, ces interpolations sont effectuées sur les hauteurs d'eau cumulées annuelles de l'année 1988 à l'année 2005, soit 18 années. Les cumuls annuels sur les pluviomètres s'échelonnent de 500 à 1400 mm. Cependant, le champ des cumuls annuels a un faible gradient. Or, il a été expliqué que certaines méthodes comme la régression classique sont, en théorie, à leur avantage dans ce type de configuration. C'est la raison pour laquelle deux autres échantillons de pluie à forte disparité spatiale pluvieuse et à plus faible volume précipité vont être utilisés.

Ainsi, les hauteurs d'eau précipitées des dix événements pluvieux les plus intenses (en 18 minutes) de la période 1988-2000 vont servir de second échantillon aux interpolations. Ces événements mettent nettement en évidence des zones particulièrement touchées par des précipitations intenses (avec des cumuls allant jusqu'à 50 mm) et des zones épargnées (sans pluie), à la différence des cumuls annuels, ce qui apporte un critère supplémentaire

d'évaluation des méthodes. Pour compléter ces échantillons de test et travailler sur de très faibles hauteurs d'eau obtenues à très faible pas de temps, les interpolations vont en outre être effectuées sur les cumuls obtenus lors de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993 (3ème épisode le plus intense en moyenne en 18 minutes sur la période 1988-2005) par pas de temps de six minutes.

De ce fait, les trois échantillons présentent des distributions surfaciques, des hauteurs d'eau précipitée et des pas de temps différents afin de couvrir toute la gamme des précipitations potentielles et de pouvoir réaliser une validation croisée la plus complète possible.

2.2.2 Principe de l'évaluation par validation croisée

Le but est de mettre en évidence la méthode fournissant des données interpolées les plus proches de la réalité. Dans cet objectif, une méthode de type *jacknife approach* qui compare un échantillon de valeurs de pluie de base à un échantillon de valeurs test lors d'un même épisode pluvieux peut être utilisée (Tomczak, 2003). Dès lors, les valeurs de l'échantillon de base servent à estimer les valeurs tests qui sont ensuite comparées aux valeurs observées. Cependant, cette méthode peut être optimisée pour obtenir une évaluation par validation croisée. Cette dernière consiste à réduire l'échantillon test à un seul pluviomètre, le reste des pluviomètres forme l'échantillon de base (méthode de type *leave one out*). Ensuite, à tour de rôle, chaque pluviomètre est utilisé en tant qu'échantillon test, et sa valeur estimée peut ainsi être comparée à sa valeur observée (Baillargeon, 2005). L'évaluation des méthodes d'interpolation par validation croisée consiste donc à estimer chaque donnée pluviométrique (échantillon test) en ne tenant compte que des autres données (échantillon de base), puis à comparer la valeur estimée (test) à la valeur observée (Arnaud et Emery, 2000).

Il existe plusieurs indicateurs utilisables afin de quantifier la distance entre le champ de pluie observé et le champ estimé, comme l'erreur quadratique (écarts entre valeur observée $z(s_i)$ et valeur estimée $\hat{z}(s_i)$ au carré) ou la distance euclidienne (racine carrée du carré des écarts entre valeur observée et estimée, i.e. de l'erreur quadratique) (Dumolard et al., 2003) Cependant, c'est la distance rectilinéaire (valeur absolue des écarts) qui va être utilisée ici, car pour beaucoup d'auteurs comme Baillargeon (2005) ou Genton et Furrer (2003), cet indice est plus robuste, notamment en présence de valeurs extrêmes.

Il sera donc considéré les valeurs observées $z(s_i)$, les valeurs estimées $\hat{z}(s_i)$, les erreurs $e(s_i) = \hat{z}(s_i) - z(s_i)$, les erreurs absolues $|e(s_i)|$ (et relatives $\frac{|e(s_i)|}{z(s_i)}$) sur lesquels reposera la comparaison des méthodes.

Les erreurs absolues $|e(s_i)|$ ont donc été calculées pour chacun des 29 pluviomètres sur les trois échantillons de pluie, et à l'aide des cinq méthodes. Ensuite, l'erreur absolue moyenne et son écart type pour chaque méthode ont été calculés, sur chaque cumul annuel, sur chaque épisode pluvieux intense et sur chaque pas de temps de six minutes de l'épisode du 29 juin 1993 du Grand Lyon. De ces erreurs absolues moyennes sur chacun des échantillons de pluie en ont été tirées une erreur d'estimation moyenne globale propre à chaque méthode d'interpolation spatiale. Ces résultats ainsi que leur interprétation font l'objet des paragraphes suivants.

2.2.3 Résultats de l'évaluation et observations

- *Evaluation des méthodes sur les hauteurs d'eau cumulées annuelles*

Les moyennes des erreurs absolues entre valeurs observées et valeurs estimées sur chacun des cumuls pluvieux annuels montrent que la différence d'estimation entre les méthodes reste faible, de l'ordre de 10 mm (figure 2.41 et 2.42), pour une hauteur d'eau précipitée annuelle comprise entre 500 et 1400 mm. L'écart type est faible et très peu variable d'une méthode à une autre (tableau 2.8). Plus précisément, nous constatons que les méthodes d'interpolation par krigeage ordinaire et régression locale donnent les erreurs d'estimation moyennes globales les plus faibles avec respectivement 49,9 mm (6,3%) et 51,4 mm (6,5 %) d'erreur (calculées chacune à partir d'une moyenne de 522 valeurs : 29 pluviomètres x 18 années), mais généralement toutes les méthodes donnent des résultats très proches et satisfaisants avec des erreurs inférieures à 7 % (tableau 2.8).

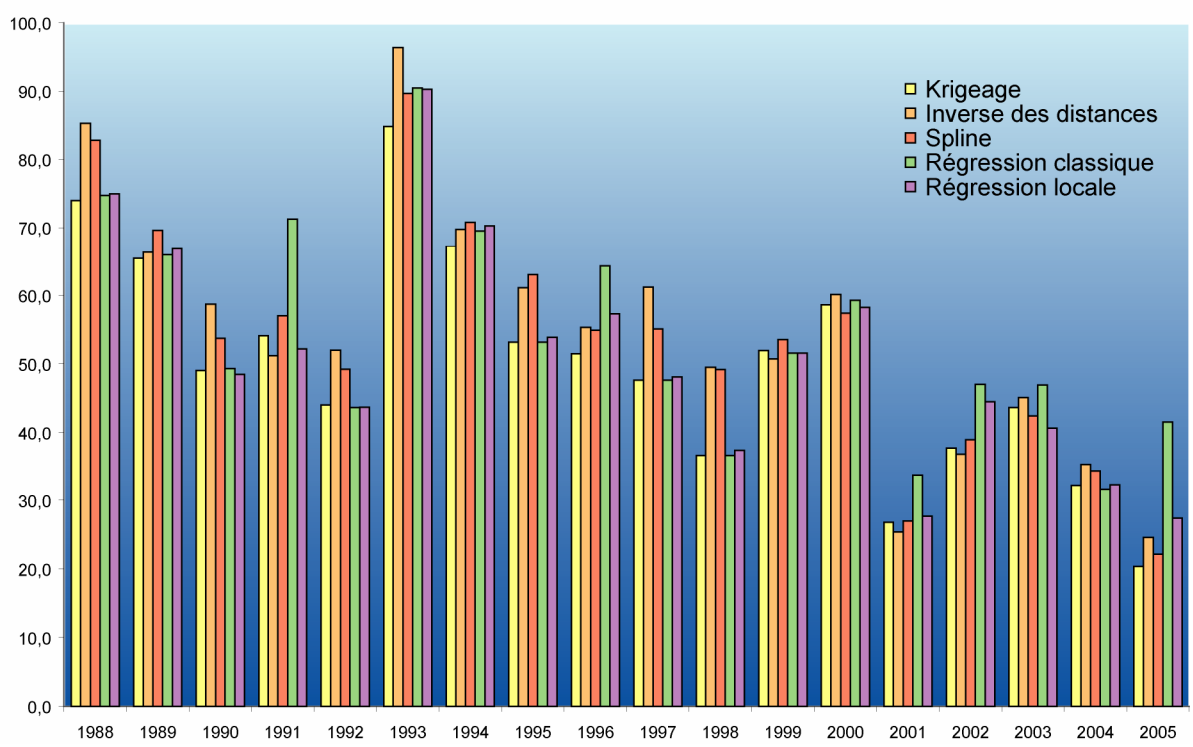


Figure 2.41 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque cumul pluvieux annuel

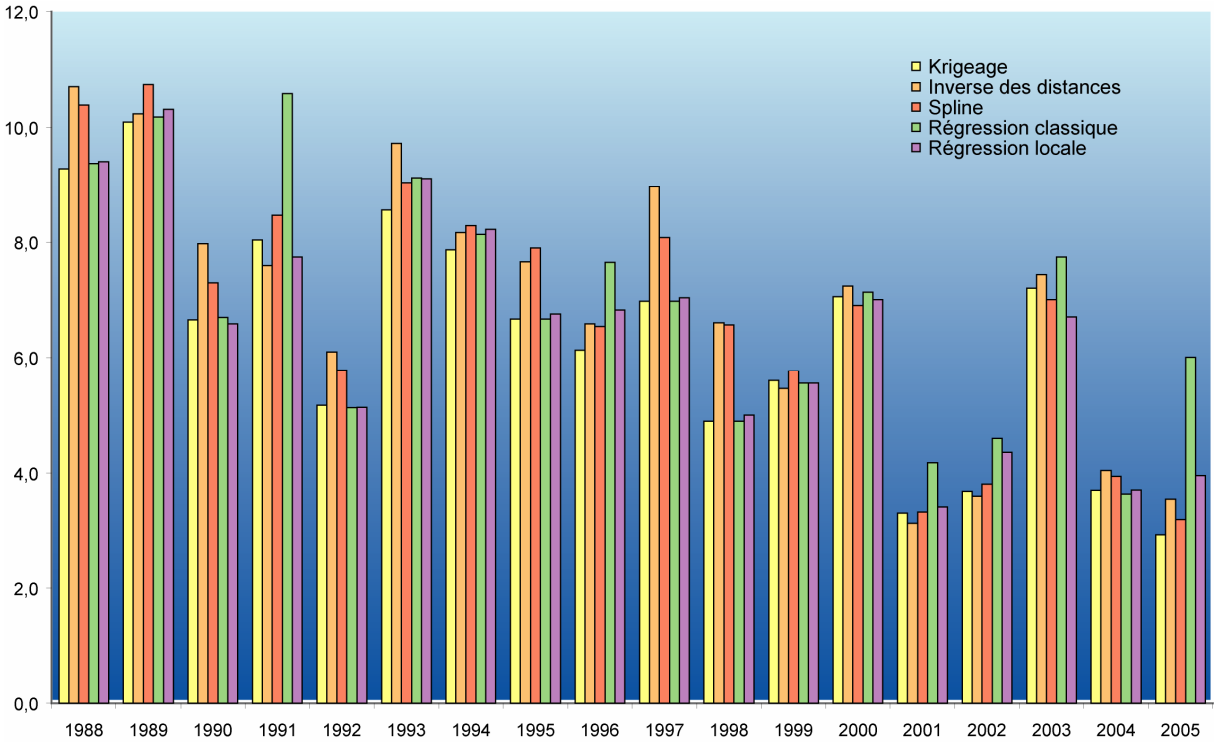


Figure 2.42 : Moyennes des erreurs relatives (%) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque cumul pluvieux annuel

Méthode d'interpolation	Krigeage	Inverse des distances	*Spline*	Régression classique	Régression locale
Erreur (mm)	$\bar{x}$: 49,9 σ : 15,9	$\bar{x}$: 54,7 σ : 17,9	$\bar{x}$: 53,9 σ : 17,1	$\bar{x}$: 54,4 σ : 15,3	$\bar{x}$: 51,4 σ : 16,1
Erreur (%)	$\bar{x}$: 6,3 σ : 2,0	$\bar{x}$: 6,9 σ : 2,2	$\bar{x}$: 6,8 σ : 2,2	$\bar{x}$: 6,9 σ : 2,0	$\bar{x}$: 6,5 σ : 2,0

Tableau 2.8 : Erreur d'estimation moyenne globale ($\bar{x}$) et écart type (σ) obtenus par validation croisée sur les cumuls annuels du Grand Lyon pour chaque méthode d'interpolation

- *Evaluation des méthodes sur les hauteurs d'eau cumulées des épisodes intenses*

Cette analyse est confirmée lorsque l'on s'intéresse aux résultats de la validation croisée concernant les épisodes les plus intenses du Grand Lyon (figure 2.43). Ici, la différence entre les valeurs à chaque épisode pour les cinq méthodes est encore plus faible. Lorsque l'on examine les erreurs d'estimation moyennes globales, il ressort que la méthode fournissant globalement les estimations les plus justes est l'interpolation par les *splines* (7,4 mm d'erreur absolue moyenne globale), suivie de près par les techniques de krigeage ordinaire (7,7 mm) et de l'inverse des distances (7,9 mm) (tableau 2.9). Cependant, lorsque l'on s'intéresse précisément à chacun des épisodes, la différence est très faible entre les méthodes de krigeage, de l'inverse des distances et des *splines*. La technique de régression globale fournit quant à elle de manière systématique, les moins bons résultats, quel que soit l'épisode.

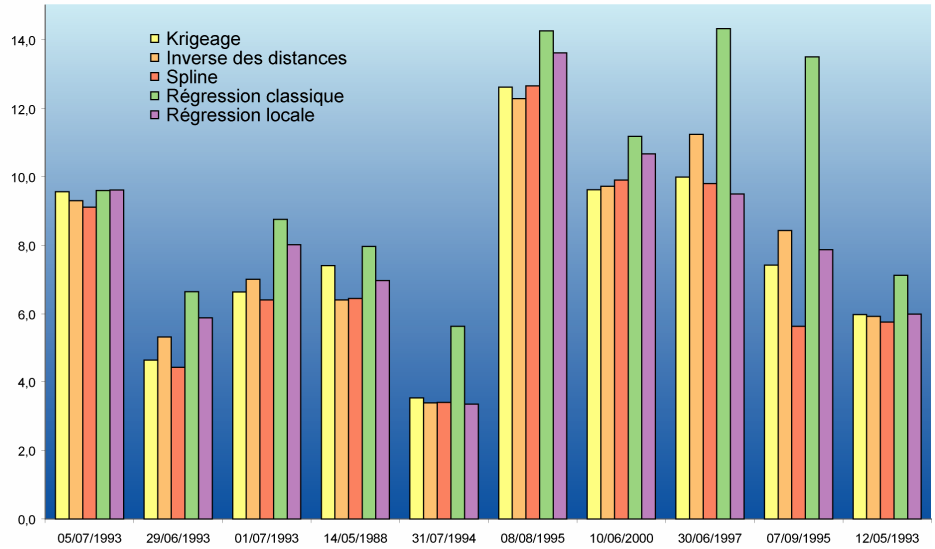


Figure 2.43 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque hauteur d'eau cumulées par épisodes intenses

Méthode d'interpolation	Krigeage	Inverse des distances	*Spline*	Régression classique	Régression locale
Erreur (mm)	$\overline{x}$: 7,7 σ : 2,6	$\overline{x}$: 7,9 σ : 2,6	$\overline{x}$: 7,4 σ : 2,7	$\overline{x}$: 9,9 σ : 3,1	$\overline{x}$: 8,2 σ : 2,7

Tableau 2.9 : Erreur d'estimation moyenne globale ($\overline{x}$) et écart type (σ) en mm, obtenus par validation croisée sur les cumuls des événements pluvieux intenses pour chaque méthode d'interpolation

- *Evaluation des méthodes sur les hauteurs d'eau à faible pas de temps de l'épisode du 29 juin 1993*

Ce constat est réaffirmé pour les hauteurs d'eau issues des cumuls au pas de temps de six minutes de l'épisode du 29 juin 1993 (figure 2.44). Les erreurs d'estimation moyennes globales se situent toutes aux alentours de 1 mm, quelle que soit la méthode (tableau 2.10), pour des hauteurs d'eau cumulées par pluviomètre allant de 0,2 mm (15h06 ; 15h12 ou 16h12), à 10 mm environ (de 15h30 à 15h42).

Naturellement, les erreurs augmentent au maximum de la pluie, de 15h30 à 15h42, et les écarts se creusent entre les méthodes. Encore une fois, la méthode de régression classique ressort parmi les autres et donne les erreurs les plus considérables pour chaque pas de temps.

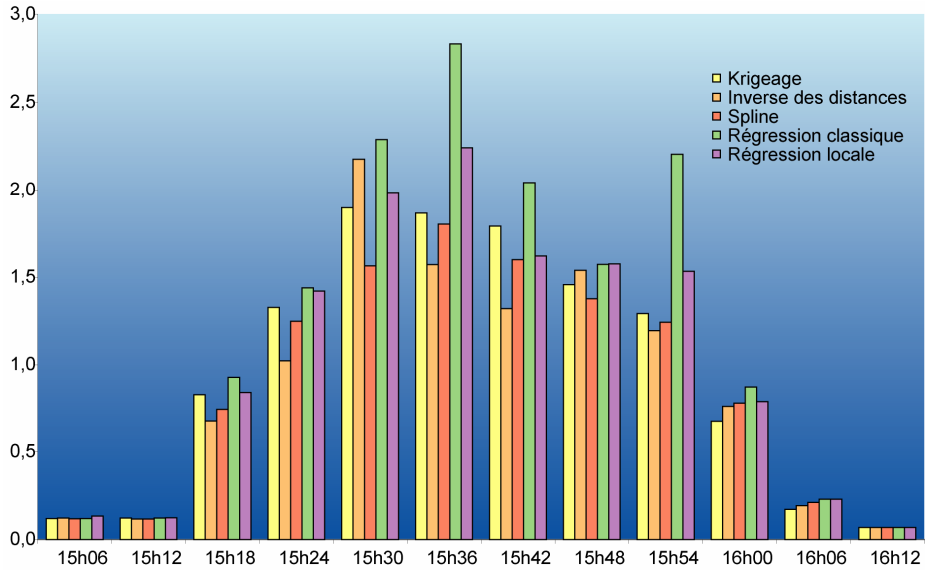


Figure 2.44 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque hauteur d'eau à faible pas de temps de l'épisode du 29 juin 1993

Méthode d'interpolation	Krigeage	Inverse des distances	Spline	Régression classique	Régression locale
Pas de temps de 6 minutes (29/06/1993)	$\bar{x}$: 1,0 σ : 0,7	$\bar{x}$: 0,9 σ : 0,7	$\bar{x}$: 0,9 σ : 0,6	$\bar{x}$: 1,2 σ : 0,9	$\bar{x}$: 1,0 σ : 0,7

Tableau 2.10 : Erreur d'estimation moyenne globale ($\bar{x}$) et écart type (σ) en mm, obtenus par validation croisée sur les hauteurs d'eau à faible pas de temps de l'épisode du 29 juin 1993

- *Commentaires et recommandations d'utilisation des méthodes*

Il ressort donc de ces résultats qu'aucune méthode ne se dégage particulièrement. Cela est lié à la configuration très particulière du réseau de mesure du Grand Lyon. Régulièrement distribué et très dense avec en moyenne un poste tous les 3,4 km, il ne laisse pas aux méthodes de grands espaces sans observations à estimer.

Des méthodes efficaces pour certains échantillons de pluies se révèlent décevantes pour d'autres. C'est le cas par exemple de la méthode des *splines*, particulièrement efficace sur les événements intenses et les hauteurs d'eau en six minutes, mais en retrait au niveau des cumuls pluvieux annuels. Il en est de même pour la technique de régression locale, performante pour l'estimation des cumuls annuels, mais en deçà sur les épisodes intenses en comparaison du krigeage, des splines, ou même de l'inverse des distances.

Il est aussi nécessaire de remarquer que les méthodes déterministes offrent des résultats semblables aux méthodes stochastiques, malgré l'avantage présupposé de ces dernières qui modélisent le phénomène pluvieux par une fonction aléatoire. À efficacité pratiquement semblable, un des facteurs à prendre en compte lors du choix d'une méthode est le degré de complexité du paramétrage ou de programmation de celle-ci, effectué à l'aide des logiciels adaptés (*Geostatistical Analyst (utilisé ici)*, *Surfer*, *Matlab*, etc.). Nous avons vu que les méthodes stochastiques étaient bien plus lourdes à mettre en place que les méthodes déterministes, surtout la régression locale ou le krigeage, notamment avec l'analyse variographique. Ainsi, il convient donc de tenir compte de l'efficacité de l'interpolation mais aussi de la complexité de sa mise en œuvre lors de l'étude de la distribution de l'aléa pluvial. Au final, et malgré la difficulté relative à son élaboration, nous avons choisi d'utiliser le krigeage ordinaire pour représenter dorénavant la répartition spatiale de cet aléa qui sera étudiée en détail dans la prochaine partie, notamment en raison de la possibilité d'étude variographique et du contrôle des erreurs d'estimation.

Synthèse de la partie : des méthodes d'interpolation à l'efficacité comparable

Une mesure précise et fiable des précipitations est indispensable pour une étude approfondie de l'aléa pluvial. De nombreuses méthodes de mesure au sol ont été développées. Depuis peu, les dispositifs captants à pesée sont les instruments de mesure qui présentent le plus de précision et de fiabilité. Ces types d'appareils vont prochainement remplacer les pluviomètres à augets basculeurs du réseau de mesure du Grand Lyon. Ce réseau qui dispose d'une trentaine de stations de mesure, fournit des données fiables depuis 1988. Ces mesures ponctuelles nécessitent d'être interpolées spatialement afin d'obtenir une vision surfacique de la distribution des pluies. Plusieurs méthodes d'interpolation spatiale de la pluie existent, avec toutes leurs avantages et leurs inconvénients respectifs. Il a donc été nécessaire d'effectuer une évaluation de ces méthodes sur le territoire du Grand Lyon. Etant donné la densité forte du réseau de mesure, aucune méthode ne se distingue particulièrement (Renard et Comby, 2006 ; Renard et Sarr, 2009). La méthode de krigeage ordinaire a cependant été retenue, car elle fournit globalement de très bons résultats, quel que soit le type de cumul à interpoler. En outre, elle nécessite une analyse variographique préalable riche d'information pour la caractérisation de l'aléa pluvial qui sera mise en œuvre dans la partie suivante. Ainsi, la deuxième partie de ce chapitre va se focaliser sur l'étude de la distribution spatiale de cet aléa à différentes échelles temporelles, et en recourant notamment à la variographie et à la spatialisation à pas de temps fin.

Partie 2 :

Caractérisation fine de l'aléa pluvial du Grand Lyon à l'aide du réseau de mesure au sol

---

L'amélioration de la connaissance de l'aléa pluvial est primordiale pour la gestion des risques associés sur l'agglomération urbaine lyonnaise. Cette connaissance conditionne l'efficacité des solutions apportées. Cependant, « les phénomènes pluvieux sont non bornés, c'est à dire qu'aucune théorie scientifique ne peut garantir qu'à un événement donné, fut-il catastrophique, ne succédera pas un événement plus catastrophique encore ; la gestion du risque est donc du domaine du jeu avec l'aléatoire » (Chocat, 1997a).

Ainsi, dans un premier temps, la distribution spatio-temporelle de longues périodes pluvieuses (annuelle, saisonnière et mensuelle) va être étudiée, pour déboucher par la suite sur une analyse temporelle plus fine, à l'échelle de l'épisode pluvieux du Grand Lyon. La répartition spatiale des cumuls de ces événements sera examinée, avant de passer à une étude descriptive de la dynamique locale de cet aléa, par le biais d'analyse variographique et d'interpolation à très fine échelle temporelle.

1. De plus fortes hauteurs d'eau sur l'est lyonnais lors des longues périodes

1.1 Constat de la variabilité spatiale et temporelle à l'échelle annuelle

Le Grand Lyon reçoit en moyenne chaque année 857 mm d'eau, avec un écart type considérable de 126 mm (moyenne 1988-2008). A l'échelle annuelle, il est généralement constaté que l'est du Grand Lyon est plus arrosé que l'ouest (figure 3.1), avec des années où ce phénomène est plus prononcé que d'autres, comme 1988 ou 1993. En annexe 2 figure les spatialisations des années de 1988 à 2008 (la légende de couleur utilisée ici va du bleu pour les plus faibles valeurs au rouge pour les plus fortes valeurs pluviométriques pour être en accord avec les représentations classiquement employée dans le milieu opérationnel).

En moyenne, un gradient de 300 mm est constaté. L'ouest de l'agglomération reçoit 700 mm environ (notamment les communes de Tassin-la-demi-lune, Saint-Genis-les-Ollières ou Craponne), et l'est approximativement 1000 mm (particulièrement les communes de Jonage et Meyzieu). Cette dichotomie avait déjà été mise en lumière par des travaux antérieurs tels ceux de J.-E. Paturel (1991), Béral-Guyonnet (1994), Nziou (1994) ou Lecourieux (1999).

Ce gradient croissant ouest - est se trouve conforté à plus large échelle (figure 3.2) et est mis en évidence à l'aide des 38 pluviomètres de la climathèque de Météo-France qui se trouvent dans un rayon de 50 km aux alentours de Lyon. Il peut être constaté un accroissement des précipitations à l'est et à l'ouest du Grand Lyon en direction des reliefs montagneux. Ce phénomène confirme les études antérieures de Béral-Guyonnet (1997) sur ce même secteur.

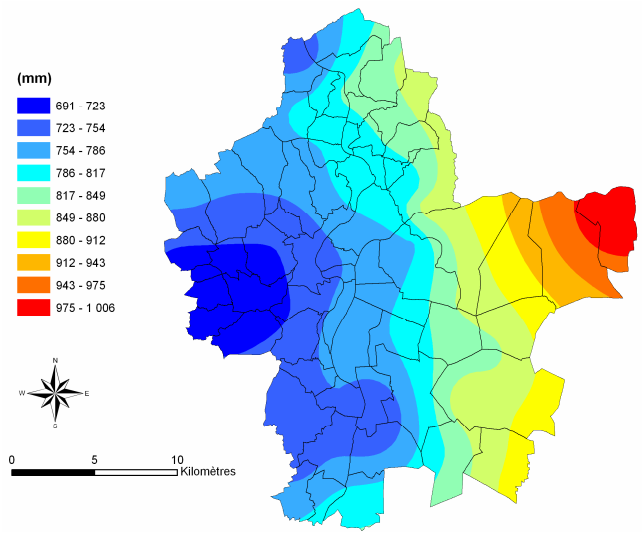


Figure 3.1 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls annuels sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

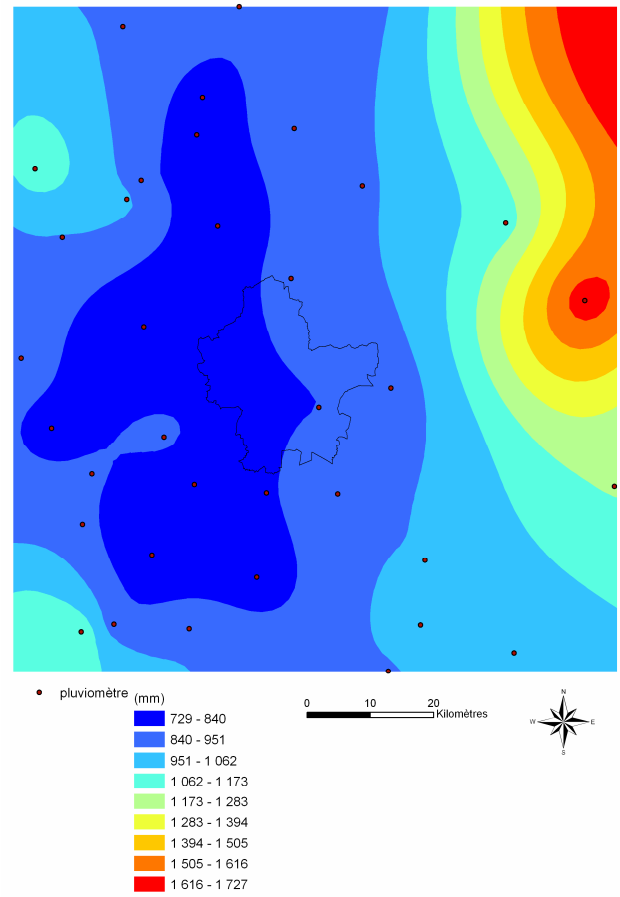


Figure 3.2 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls annuels à proximité du Grand Lyon, période 1988 – 2008 (postes pluviométriques du réseau de Météo-France)

La variabilité pluviométrique interannuelle est très forte. Des années très humides peuvent être suivies d'années très sèches, et inversement, comme ce fut le cas entre 1988 (851 mm en moyenne sur l'agglomération) et 1989 (637mm), ou 2002 (1049 mm) et 2003 (704,5 mm) (figure 3.3).

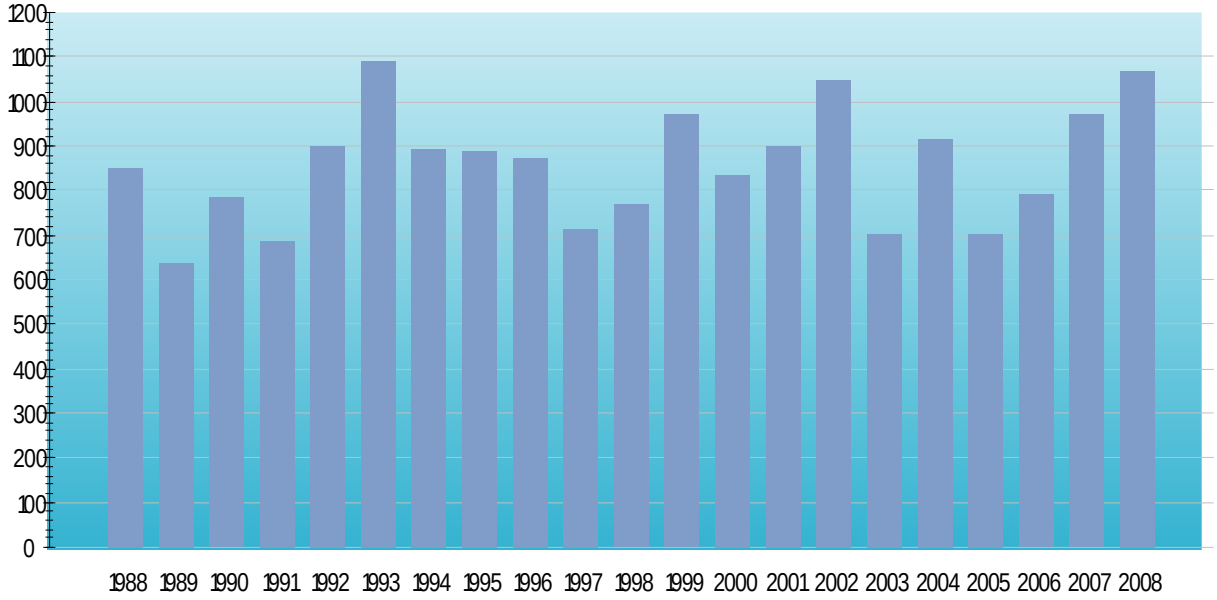


Figure 3.3 : Hauteurs d'eau annuelles (mm) sur le Grand Lyon (moyenne des pluviomètres opérationnels)

1.2 Constat de la variabilité pluvieuse aux échelles saisonnières et mensuelles

Ce gradient croissant ouest - est se retrouve lorsque l'on s'intéresse aux saisons (les saisons astronomiques sont utilisées ici, définies par les solstices et les équinoxes). En effet, toutes les saisons présentent ce gradient (fig. 3.4 à 3.7). La saison la plus pluvieuse est l'automne, avec des gradients allant de 222 à 285 mm, et la moins pluvieuse est l'hiver, avec un cumul moyen maximum de 154 mm seulement.

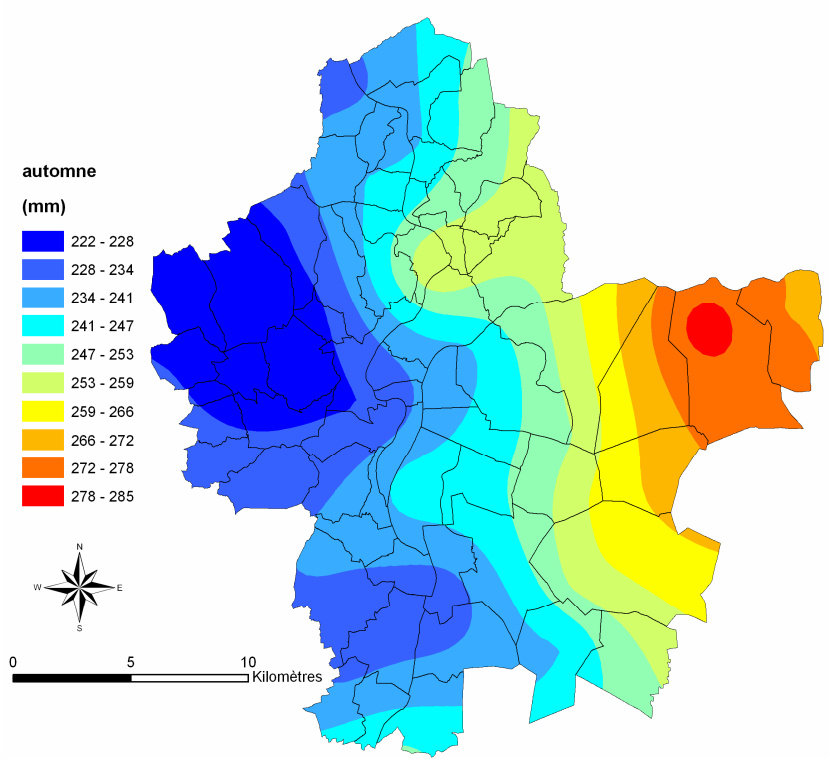


Figure 3.4 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de l'automne sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

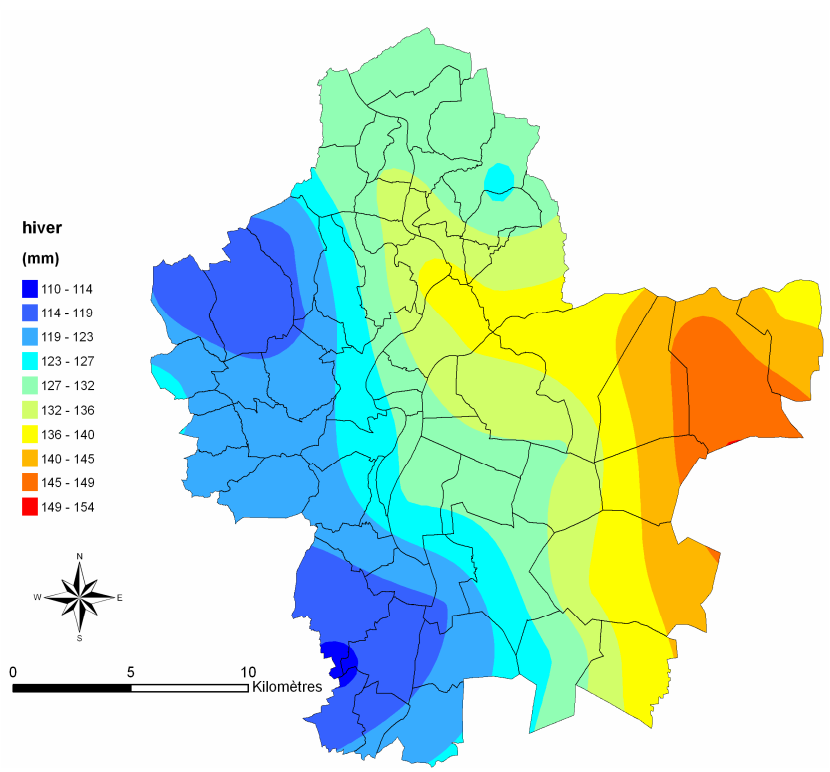


Figure 3.5 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de l'hiver sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

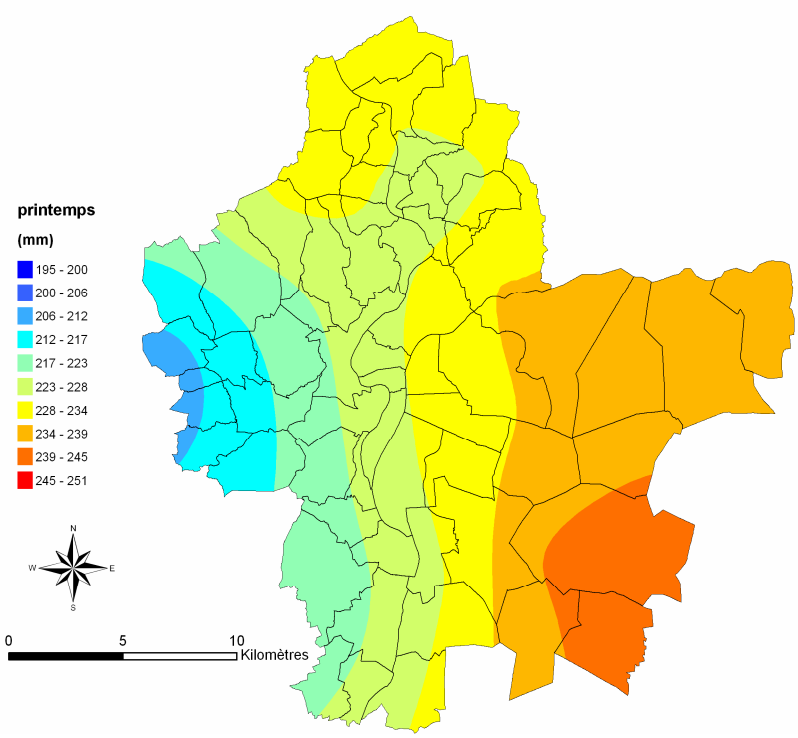


Figure 3.6 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls du printemps sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

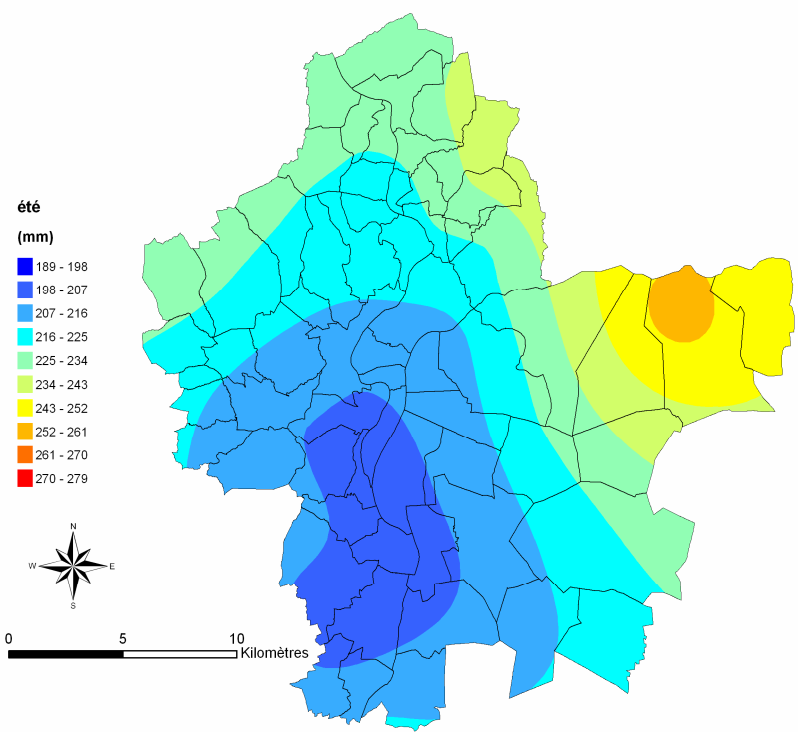


Figure 3.7 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de l'été sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

Cependant, une analyse plus fine doit être faite mois par mois. Comme à l'échelle annuelle et saisonnière, le gradient est bien présent à l'échelle mensuelle. En effet, celui-ci peut être retrouvé d'une manière plus ou moins marquée sur tous les cumuls moyens mensuels (période 1988 – 2008), comme en mai ou en septembre (fig. 3.8 et 3.9).

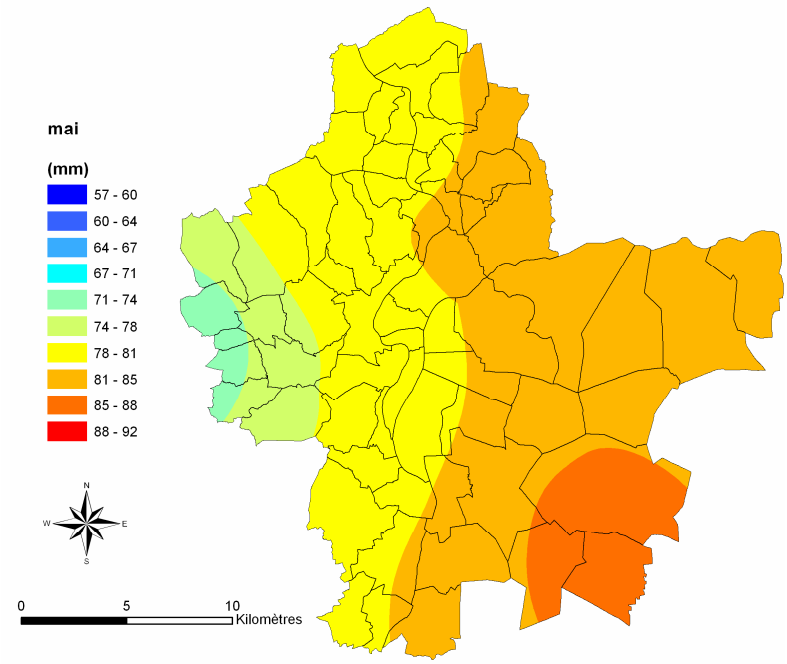


Figure 3.8 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de mai sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

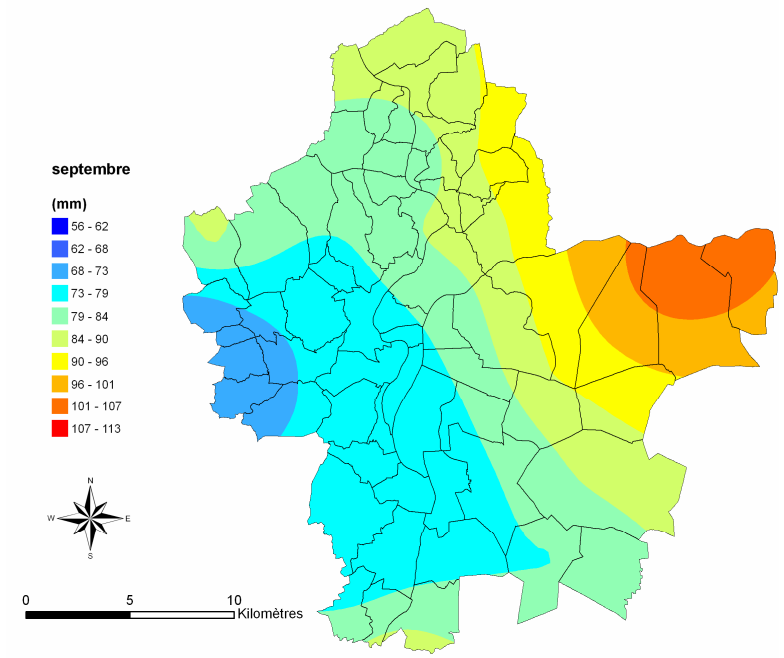


Figure 3.9 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de septembre sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

Cependant, un mois semble échapper à cette règle. Il s'agit du mois d'août, où les plus faibles cumuls se manifestent au cœur de l'agglomération (fig. 3.10). En annexe 3 figure les spatialisations de tous les cumuls moyens mensuels (période 1988 - 2008).

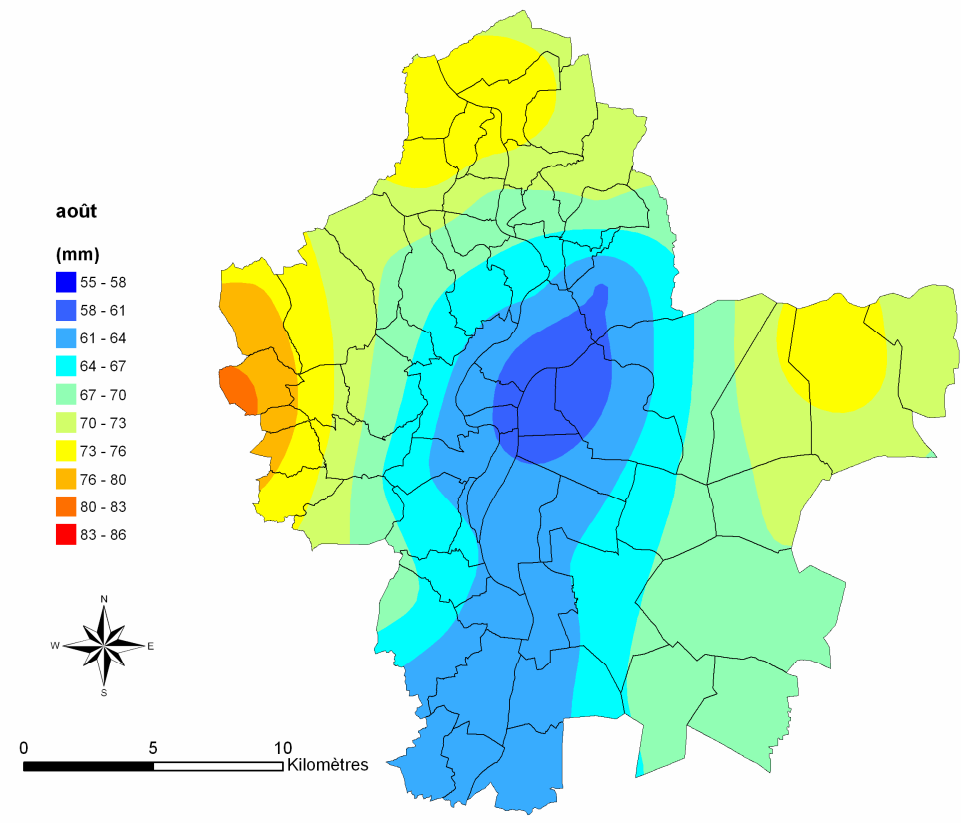


Figure 3.10 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de septembre sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008

A l'échelle mensuelle, il est constaté que les trois mois les plus arrosés sont septembre, octobre et novembre, avec respectivement en moyenne 93 mm, 103 mm et 93 mm sur la période 1988 – 2008. Les mois les moins arrosés sont janvier et février avec 46 mm et 38 mm respectivement (figure 3.11).

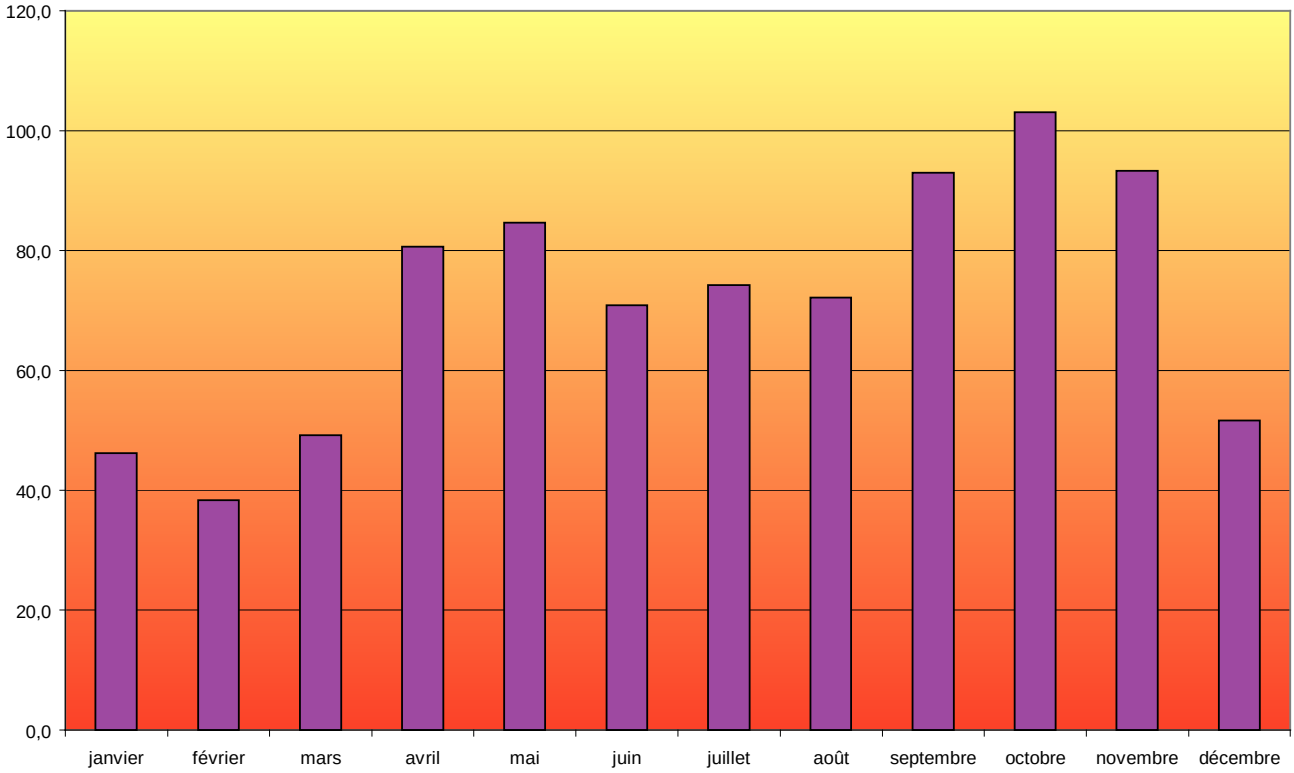


Figure 3.11 : Moyennes mensuelles des hauteurs d'eau (mm) sur le Grand Lyon, (moyenne des pluviomètres opérationnels pour la période 1988 - 2008)

Il existe d'énormes différences concernant les hauteurs d'eau cumulées pour un même mois entre les différentes années sur la période 1988-2008 (tableau 3.1). Par exemple, il est tombé seulement 4,9 mm en février 1993, mais 84,9 mm en 1995. Le mois de mars 1990 n'a reçu que 11,2 mm, mais l'année suivante, le même mois a cumulé 105,2 mm.

	janvier	**février**	**mars**	**avril**	**mai**	**juin**	**juillet**	**août**	**septembre**	**octobre**	**novembre**	**décembre**	**cumul annuel**
1988	64,6	49,5	80,8	66,7	136,9	62,0	82,9	53,9	54,4	137,5	23,3	38,5	851,0
1989	11,8	51,7	35,0	189,0	47,1	21,2	48,2	32,0	47,0	31,8	94,0	27,8	636,6
1990	46,1	63,0	11,2	68,5	74,9	102,4	41,8	47,5	42,4	108,8	107,5	70,2	784,6
1991	14,8	25,7	105,2	36,6	19,6	72,7	29,9	19,6	186,6	90,1	67,0	20,5	688,3
1992	22,8	30,2	53,6	75,3	80,5	143,9	62,6	88,1	78,2	124,8	97,5	41,4	898,9
1993	15,6	4,9	9,9	80,5	117,1	61,3	111,5	86,6	245,9	252,6	51,3	54,8	1092,0
1994	114,9	24,4	21,9	87,6	74,2	68,7	66,4	58,6	186,7	71,6	95,0	25,7	895,7
1995	65,1	84,9	40,4	104,4	110,2	24,2	35,5	92,7	154,6	80,6	41,1	56,5	890,1
1996	40,7	36,1	29,0	32,6	107,2	69,5	133,5	52,8	30,1	47,7	216,2	78,8	874,3
1997	69,0	18,3	7,3	21,0	94,8	142,4	54,0	51,8	37,3	46,1	102,4	67,8	712,2
1998	49,0	19,0	27,7	145,8	85,9	60,6	42,5	34,8	162,6	63,5	52,1	27,3	770,6
1999	61,3	52,7	64,0	80,6	67,4	71,1	87,1	81,3	136,4	161,4	64,0	44,6	971,9
2000	12,1	44,9	36,5	100,0	70,6	55,3	60,1	81,9	64,5	136,9	111,9	57,6	832,4
2001	66,0	22,5	161,4	71,7	95,0	99,0	97,4	39,2	70,6	127,3	37,1	10,9	898,2

2002	29,0	49,4	40,4	16,9	149,1	69,7	99,3	83,1	90,4	71,9	273,6	76,5	1049,3
2003	40,3	12,1	17,0	33,2	45,3	32,3	75,1	40,4	51,9	130,1	77,6	149,3	704,5
2004	66,3	47,9	78,7	51,8	29,7	29,8	82,3	186,1	25,8	183,6	88,4	48,0	918,3
2005	35,4	34,4	20,7	201,0	59,1	51,6	39,7	37,2	39,2	86,2	67,3	31,1	702,9
2006	32,7	50,6	98,7	67,4	68,3	38,7	54,8	97,0	50,4	65,2	99,5	68,7	792,0
2007	51,2	60,1	42,4	33,5	150,7	141,1	121,7	146,6	77,7	20,5	92,1	32,9	970,6
2008	60,8	22,7	50,6	129,7	95,0	69,9	132,9	104,2	119,4	127,6	98,8	55,5	1067,1
moyenne	46,2	38,3	49,2	80,7	84,7	70,8	74,3	72,2	93,0	103,1	93,2	51,6	857,2
écart type	24,6	19,1	37,2	49,6	34,9	35,8	31,4	39,2	61,0	54,0	55,7	28,8	126,3

Tableau 3.1 : Cumuls moyens annuels (mm - période 1988 – 2008)

La variabilité inter et intra annuelle de la pluviométrie du Grand Lyon est très forte. Cependant, le gradient croissant ouest - est se manifeste à l'échelle annuelle, comme à l'échelle saisonnière et mensuelle. Or, qu'en est-il à l'échelle de l'épisode pluvieux, notamment durant les événements responsables d'inondation par ruissellement sur l'agglomération ? Retrouve-t-on ce gradient, ou est-ce l'aléatoire dans la distribution pluvieuse qui prime ?

2. Des tendances communes dans les répartitions spatio-temporelles des cumuls des épisodes pluvieux

A l'échelle annuelle comme à l'échelle saisonnière ou mensuelle, il peut être remarqué un gradient croissant ouest - est. Pour le contrôle des inondations, cette connaissance à une si large échelle temporelle a peu d'utilité pour les gestionnaires du Grand Lyon qui se doivent de gérer l'aléa pluvial à l'échelle de l'épisode pluvial. Or, qu'en est-il de la distribution de cet aléa à cette échelle, notamment durant les épisodes pluvieux à l'origine de désagréments dans l'agglomération ? A cette échelle temporelle, le premier travail préalable est d'identifier les événements.

2.1 Identification d'un épisode pluvieux

La sélection d'épisodes pluvieux par le biais de différents seuils physiques comme l'intensité, la durée, la hauteur d'eau totale précipitée ou la période de retour nécessite l'utilisation de critères d'indépendance, notamment lorsque deux averses semblent temporellement voisines. Il existe plusieurs critères d'indépendance, surtout prévus pour un seul pluviomètre (et non un réseau dense comme celui du Grand Lyon), comme celui de Bouvier et al. (1999) où « deux averses sont individualisées si l'intensité de la précipitation ne dépasse pas 1 mm/h pendant au moins 60 minutes » sur le pluviomètre.

Le critère d'indépendance utilisé dans cette étude pour identifier les pluies sur l'agglomération urbaine lyonnaise est celui retenu et défini par Chocat et Bardin (2002). Il est constitué de paramètres retenus par la Direction de l'Eau du Grand Lyon qui respectent les directives du guide du Certu « la ville et son assainissement » (Certu, 2003). Un début de pluie est identifié si une intensité moyenne en 18 minutes supérieure ou égale à 2 mm/h sur au moins un poste pluviométrique est mesurée. Une fin de pluie est déterminée lorsque l'on observe une période minimum de quatre heures durant laquelle on mesure moins de quatre basculements d'auget sur l'ensemble du réseau de mesure au sol. En outre, les « fins de pluies » correspondant à des périodes où l'intensité moyenne reste inférieure à 2 mm/h pendant 18 minutes sur la totalité des postes pluviométriques sont éliminées. Enfin, et pour ne pas encombrer les bases de données de précipitations insignifiantes, les pluies qui présentent une lame d'eau moyenne sur l'ensemble de la grille inférieure à 2 mm ou une intensité moyenne maximum observée en 18 minutes inférieure à 4 mm/h sur la totalité des postes ne sont pas retenues (Chocat et Bardin, 2002).

Cette sélection a conduit à retenir un nombre annuel de pluies qui s'échelonne de 40 en 1989 et 1991 à 82 en 2008, avec une moyenne de 56,5 pluies par an, avec un écart-type de 10,2 pluies (tableau 3.2). Ces résultats reflètent bien encore une fois la variabilité interannuelle des pluies.

Année	Nombre de pluies
1988	55
1989	40
1990	53
1991	40
1992	54
1993	57
1994	55
1995	57

1996	56
1997	46
1998	54
1999	55
2000	53
2001	60
2002	73
2003	50
2004	64
2005	46
2006	62
2007	74
2008	82
Moyenne	56,5
Ecart type	10,2

Tableau 3.2 : Nombre de pluies annuelles d'après les critères de sélection utilisés

2.2 Caractérisation et sélection des pluies remarquables lyonnaises

Il convient maintenant de s'intéresser aux pluies qui sont susceptibles de provoquer des nuisances à la collectivité, de par leurs caractéristiques physiques hors normes, « trop atypiques pour pouvoir les classifier facilement avec les événements plus courants » (Chocat et Bardin, 2002).

Ces pluies sont couramment désignées par les termes « extrêmes » ou « exceptionnelles » (Muller et al., 2009). Or, il convient de faire attention à la terminologie de ces pluies. Une pluie exceptionnelle en un endroit le sera rarement en un autre, le caractère exceptionnel d'une pluie n'est significatif que pour une échelle spatiale et temporelle donnée (Comby, 1998 ; 2004a ; 2004b et 2010). Pour A. Douguedroit (2010), le « qualificatif extrême est en général appliqué à des épisodes pluvieux de plus de 200 mm (quelquefois 190), avec plusieurs averses ». Pour J.-P. Marchand (2004), le terme « extrême » n'a souvent qu'une « signification médiatique », « difficile à prendre en compte et à conceptualiser ». C'est pourquoi le terme « remarquable » sera employé pour dénommer ces épisodes pluvieux atypiques de par leurs critères physiques, comme le fait par exemple Météo-France (Deblaère et Fabry, 1998).

Or, il est maintenant nécessaire de déterminer les critères physiques pertinents. Une analyse en composantes principales (ACP) a été réalisée en 2002 par l'Unité de Recherche en Génie Civil – Hydrologie Urbaine de l'INSA de Lyon (Chocat et Bardin, 2002) afin de dégager ces critères. Cette ACP a porté sur sept variables : durée de l'épisode, hauteur totale moyenne précipitée sur le réseau, et intensités moyennes maximales en 6, 18, 30, 60 et 120 minutes. Elle a permis de retenir trois variables de répartition : la hauteur totale, la durée, et l'intensité moyenne maximale en 18 minutes. La figure 3.12 nous montre que la variable de la hauteur totale et celle de la durée se trouvent sur un axe horizontal. La variable de l'intensité moyenne maximale en 18 minutes s'aligne avec les précédentes sur un axe vertical. Ces variables composites qui définissent ces deux axes « expliquent à elles seules près de 95% de la variance totale », et cette étude montre que ces critères de répartition sont « suffisants pour classifier les pluies » (Chocat et Bardin, 2002).

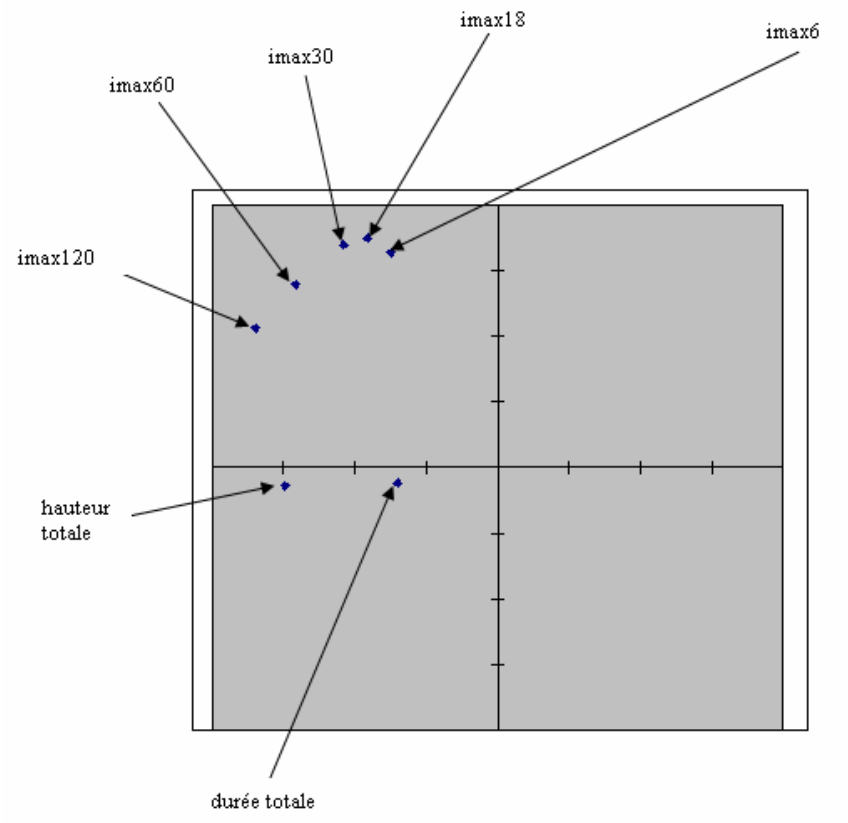


Figure 3.12 : Analyse en composantes principales des pluies observées à Lyon entre 1988 et 2000 (Chocat et Bardin, 2002).

Afin de travailler sur un échantillon de pluies considérable et suffisamment représentatif, les 25 pluies les plus remarquables en termes de hauteur totale moyenne cumulée, en termes de durée et en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes de la période 1988 – 2005 ont été sélectionnées. Les dates et les caractéristiques de ces pluies figurent dans les tableaux 3.3 ; 3.4 et 3.5.

Pluie	Hauteur totale moyenne (mm)
01/12/2003	118,1
15/04/2005	117,9
22/09/1993	84,3
12/11/1996	83,7
22/10/1999	79,2
28/09/1991	76,1
23/11/2002	66,3
07/10/1993	61,4
04/10/1995	60,1
14/07/2001	60
01/05/2002	57,8
21/06/1997	54,7
25/10/2004	53,2
05/07/1999	52,1
12/09/1995	51,7
07/07/1996	51,7
05/10/1993	51
12/09/1994	50,5
05/11/1994	50
17/08/2004	49,9
18/05/1996	49,4
03/11/1989	48,2
13/03/2004	47,6
12/10/2000	46,4
25/04/1989	44,9

Tableau 3.3 : Dates et cumuls moyens (mm) des 25 pluies les plus remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée de la période 1988-2005

Pluie	Durée (h)
15/04/2005	56,1
01/05/2002	43,3
07/10/1993	36,6
01/12/2003	34,6
23/11/2002	34,1
25/04/1989	33,8
07/07/1996	32,6
26/03/1999	32,4
12/09/1995	31,2
07/04/2005	31,2
15/10/1996	30,3
22/09/2001	29,5
28/09/1991	29,2
16/07/2002	28,8
29/09/1988	28,7
10/05/1989	28,6
21/06/1997	27,1
25/11/1996	27

16/10/2002	26,6
24/10/1999	25,6
28/10/1990	25,2
20/11/1990	25,2
10/10/1988	25,1
10/06/1992	25,1
18/09/1995	24,8

Tableau 3.4 : Dates et durée (h) des 25 pluies les plus remarquables en termes de durée de la période 1988-2005. Les dates en rouges sont communes avec les pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée

Pluie	Intensité maximale moyenne en 18 minutes (mm/h)
05/07/1993	140,7
09/09/2002	113,3
29/06/1993	112,7
01/07/1993	112
04/08/2004	111,3
14/05/1988	111,3
31/07/1994	108,7
08/08/1995	108
10/06/2000	104
30/06/1997	98
07/09/1995	95,3
23/07/2004	92
12/05/1993	92
21/08/1992	91,3
19/09/2002	90
08/06/1996	89,3
24/08/1995	88
29/07/2005	87,3
29/07/1990	86,7
16/06/1988	86
29/07/1996	84,7
07/08/1997	84
12/05/1995	83,3
20/08/2000	82
19/06/1994	82

Tableau 3.5 : Dates et intensité maximale moyenne en 18 minutes (mm/h) des 25 pluies les plus remarquables en termes d'intensité maximale moyenne en 18 minutes de la période 1988-2005.

Ces tableaux indiquent que dix pluies parmi les plus remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée figurent parmi les pluies les plus remarquables en termes de durée. Plus précisément, les sept pluies les plus abondantes sont les sept plus longues. Au contraire, aucune pluie remarquable en termes de hauteur d'eau ou de durée ne figure dans la liste des pluies remarquables en termes d'intensité maximale moyenne en 18 minutes. Cette liste nous informe en outre que trois des quatre pluies les plus intenses en 18 minutes enregistrées en 18 ans ont eu lieu en moins d'une semaine, entre le 29 juin et le 5 juillet 1993. Elles ont également commencé presque à la même heure, à 15h24 ; 15h06 et 15h18. Cela nous conduit à nous pencher sur la distribution temporelle de ces pluies remarquables avant d'en étudier la répartition spatiale.

2.3 Une distribution des pluies remarquables centrée sur les mois d'automne

La distribution annuelle des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau ou de durée se concentre de mars à décembre, mais préférentiellement durant les mois de septembre, d'octobre et de novembre. En effet, ces trois mois regroupent 56 % des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée, et 56 % également des pluies remarquables en termes de durée.

La distribution temporelle des pluies remarquables en termes d'intensité maximale en 18 minutes est beaucoup plus resserrée. En effet, ces dernières se répartissent uniquement sur cinq mois, de mai à septembre. Plus précisément, les mois de juin, de juillet et d'août concentrent 72 % de ces pluies (fig. 3.13).

Lorsque l'on s'intéresse plus précisément à l'heure de début de ces pluies, nous constatons que les pluies remarquables en termes de hauteur d'eau ou de durée n'ont pas d'horaire préférentiel de commencement, s'échelonnant d'une manière assez homogène tout au long de la journée. Au contraire, les pluies remarquables en termes d'intensité semblent préférentiellement commencer entre 12h et 17h. Ce créneau horaire concentre à lui seul 63% de ces épisodes, et 29% de ces pluies commencent entre 15h et 16h (fig. 3.14).

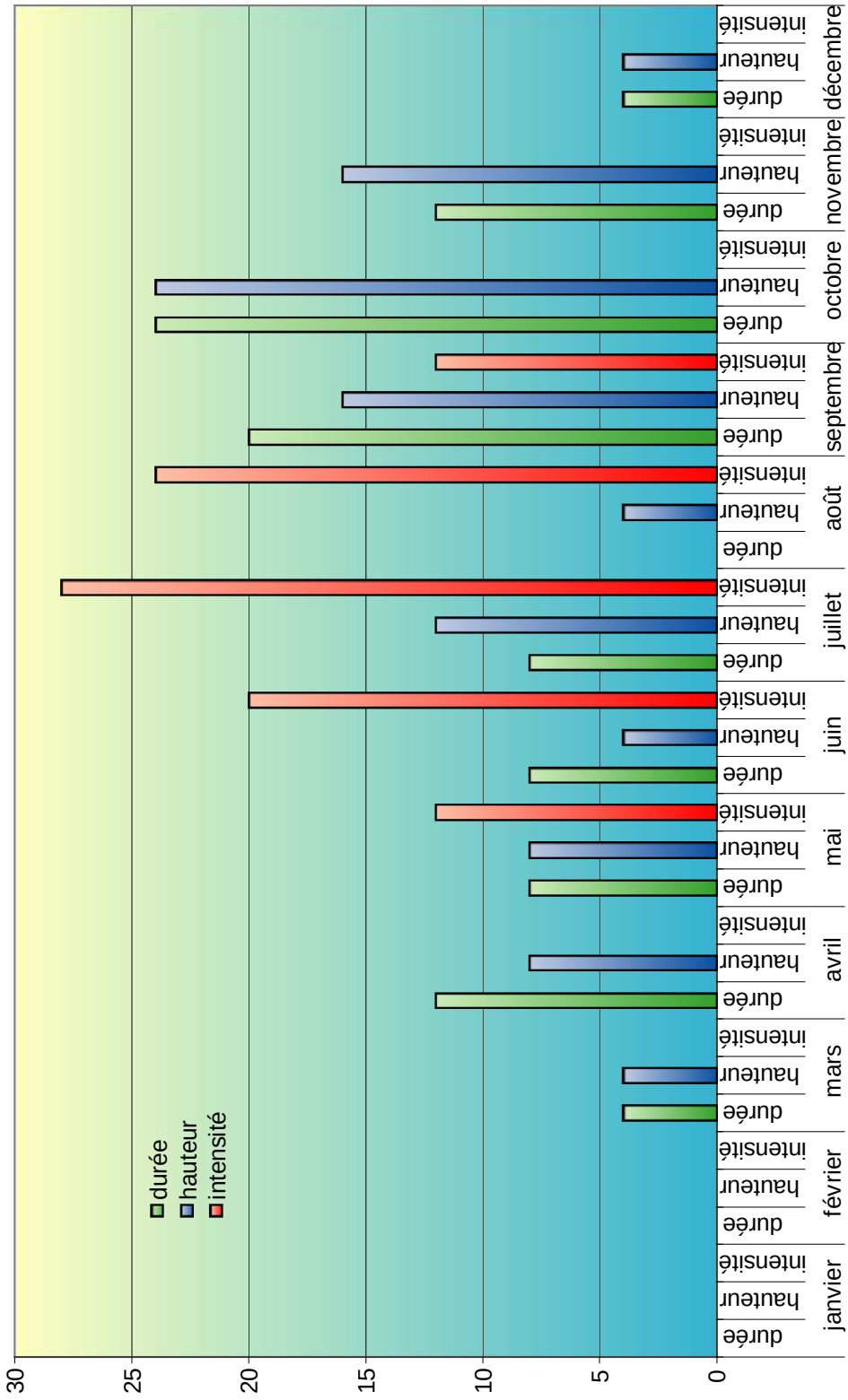


Figure 3.13 : Répartition temporelle annuelle (%) de chacun des types de pluies remarquables (période 1988 – 2005)

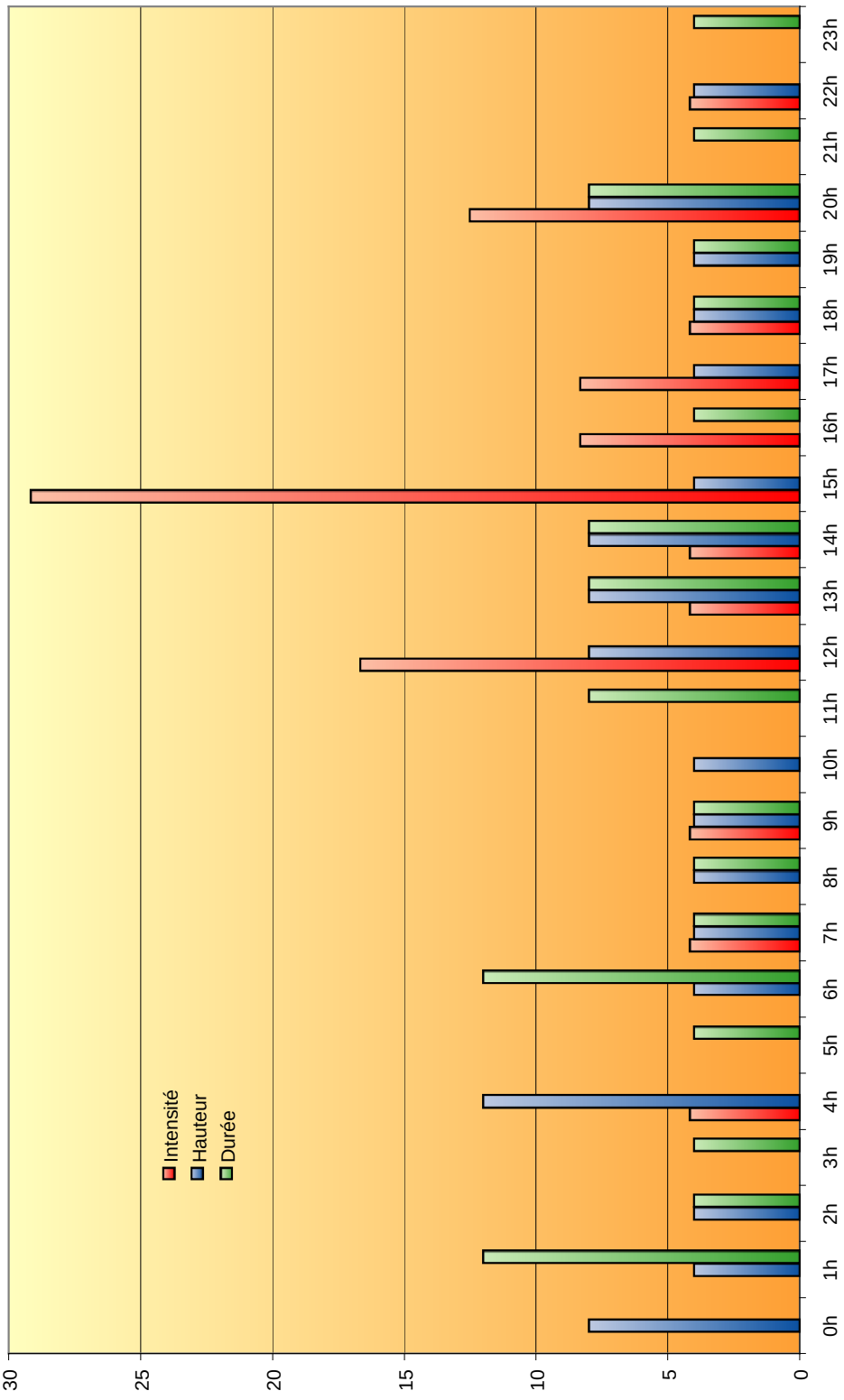


Figure 3.14 : Répartition temporelle horaire (%) des trois types de pluies remarquables (période 1988 – 2005)

2.4 Une répartition spatiale aléatoire des pluies remarquables?

2.4.1 En termes de hauteur d'eau totale précipitée

La répartition spatiale des pluies remarquables en terme de hauteur d'eau totale précipitée varie considérablement d'un épisode à l'autre. Aucune zone ne semble constamment plus touchée qu'une autre à chaque épisode. Toutes les zones de l'agglomération peuvent être concernées par le cumul des plus fortes hauteurs d'eau. En annexe 4 figure l'interpolation spatiale de tous les cumuls d'eau de ces épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée. Pour exemple représentatif, c'est le sud-ouest de l'agglomération qui a été le plus touché lors de l'épisode du 1er décembre 2003 (fig. 3.15), mais durant celui du 03 novembre 1989, il s'agissait de l'est lyonnais (fig. 3.16).

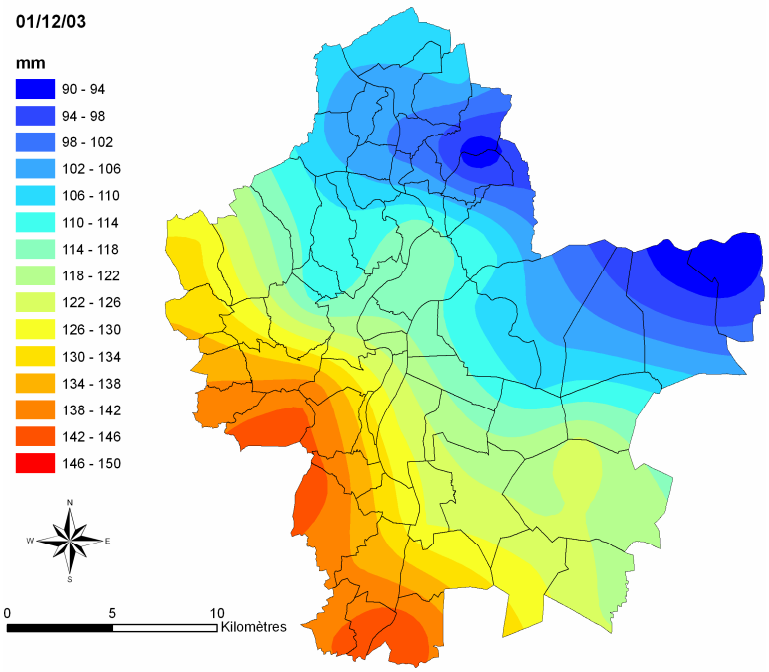


Figure 3.15 : Krigeage ordinaire de l'épisode du 1er décembre 2003

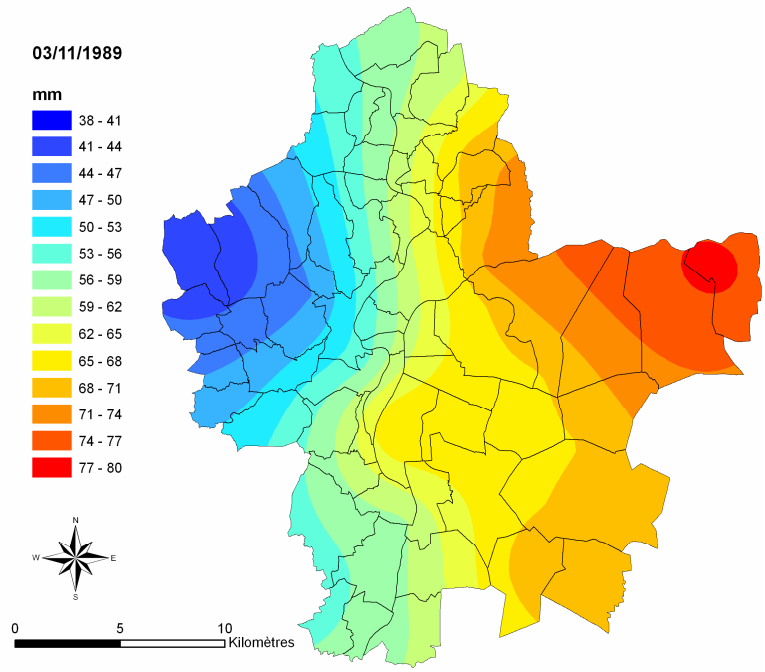


Figure 3.16 : Krigeage ordinaire de l'épisode du 03 novembre 1989

Le tableau 3.6 nous indique les zones les plus arrosées pour chaque épisode. La variabilité d'un épisode à l'autre est très forte, et tous les secteurs de l'agglomération sont concernés. De ces observations, il ressort toutefois que l'est lyonnais a été touché dans 56 % des épisodes (tableau 3.7).

Pluie	Zone la plus touchée
01/12/2003	sud-ouest
15/04/2005	sud-est
22/09/1993	uniforme
12/11/1996	nord-ouest
22/10/1999	est
28/09/1991	nord
23/11/2002	sud-est
07/10/1993	est
04/10/1995	sud-est
14/07/2001	centre
01/05/2002	sud-est
21/06/1997	est
25/10/2004	sud-est
05/07/1999	ouest
12/09/1995	centre
07/07/1996	nord-ouest et est
05/10/1993	nord
12/09/1994	centre-est
05/11/1994	sud
17/08/2004	centre-est
18/05/1996	sud
03/11/1989	est

13/03/2004	est
12/10/2000	sud-est
25/04/1989	nord-ouest

Tableau 3.6 : Zones de l'agglomération les plus arrosées durant les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée.

Zone de l'agglomération arrosée	%
nord	20
sud	36
est	56
ouest	20
centre	16

Tableau 3.7 : Proportion des zones de l'agglomération les plus arrosées (%) durant les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée.

En moyenne, la hauteur d'eau cumulée de chacun de ces épisodes est de 65 mm. Or, nous avons vu que la répartition de la pluie durant ces épisodes n'est pas uniforme, et des variations spatiales entre pluviomètres existent. Lorsque l'on s'intéresse à la répartition spatiale des écarts au cumul moyen de tous ces épisodes, nous retrouvons le constat précédent : l'est de l'agglomération est légèrement plus arrosé et présente un faible excédent de 2 mm environ par rapport à la moyenne, soit 3 % environ (fig. 3.17). Ce résultat vient confirmer les observations des paragraphes précédents sur les forts volumes d'eau précipités à l'échelle annuelle, saisonnière et mensuelle, où l'est de l'agglomération était constamment la zone la plus arrosée, avec le même gradient croissant ouest - est.

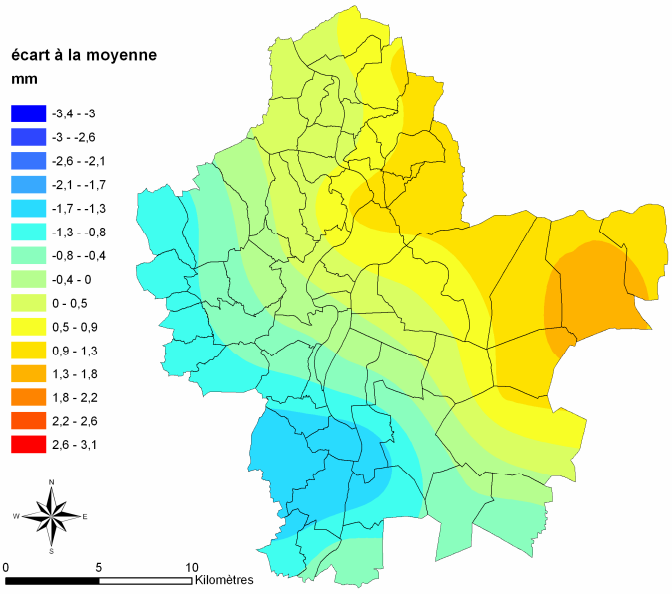


Figure 3.17 : Krigeage ordinaire des écarts au cumul moyen des épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau (65 mm)

2.4.2 En termes de durée

Concernant les pluies remarquables en termes de durée, les mêmes constats peuvent être dressés. Dans un premier temps, la distribution entre les différents épisodes est également très aléatoire. Aucune zone de l'agglomération ne semble constamment préférentiellement touchée, toutes sont concernées (tableau 3.8). Parfois, il s'agit uniquement du nord-ouest, comme le 16 juillet 2002, quelquefois seulement le sud, tel lors de l'épisode du 15 octobre 1996, ou encore uniquement l'ouest, pendant l'événement du 18 septembre 1995. Les interpolations spatiales de tous les cumuls d'eau de ces épisodes remarquables en termes de durée se trouvent en annexe 5.

Pluie	Zone la plus touchée
15/04/2005	sud-est
01/05/2002	sud-est
07/10/1993	est
01/12/2003	sud-ouest
23/11/2002	sud-est
25/04/1989	nord-ouest
07/07/1996	nord-ouest et est
26/03/1999	sud-est
12/09/1995	centre
07/04/2005	nord
15/10/1996	sud
22/09/2001	sud-ouest
28/09/1991	nord
16/07/2002	nord-ouest
29/09/1988	est
10/05/1989	nord-ouest
21/06/1997	est
25/11/1996	sud-est
16/10/2002	est
24/10/1999	nord-ouest
28/10/1990	sud
20/11/1990	sud-est
10/10/1988	est
10/06/1992	sud-est
18/09/1995	ouest

Tableau 3.8 : Zones de l'agglomération les plus arrosées durant les épisodes remarquables en termes de durée.

Cependant, de la même manière que pour les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau, l'est de l'agglomération est concerné ici aussi dans 52 % des cas (tableau 3.9).

Zone de l'agglomération arrosée	%
nord	28
sud	44
est	52
ouest	32
centre	4

Tableau 3.9 : Proportion des zones de l'agglomération les plus arrosées (%) durant les épisodes remarquables en termes de durée.

De la même manière que pour les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau, ce constat est vérifié lorsque l'on s'intéresse aux écarts au cumul moyen des pluies remarquables en termes de durée. Durant ces épisodes, il est tombé en moyenne 45,4 mm. Le gradient croissant ouest - est se trouve une nouvelle fois vérifié, et l'est du Grand Lyon accuse une hauteur d'eau supplémentaire de 2,5 mm environ, soit 6 % (fig. 3.18).

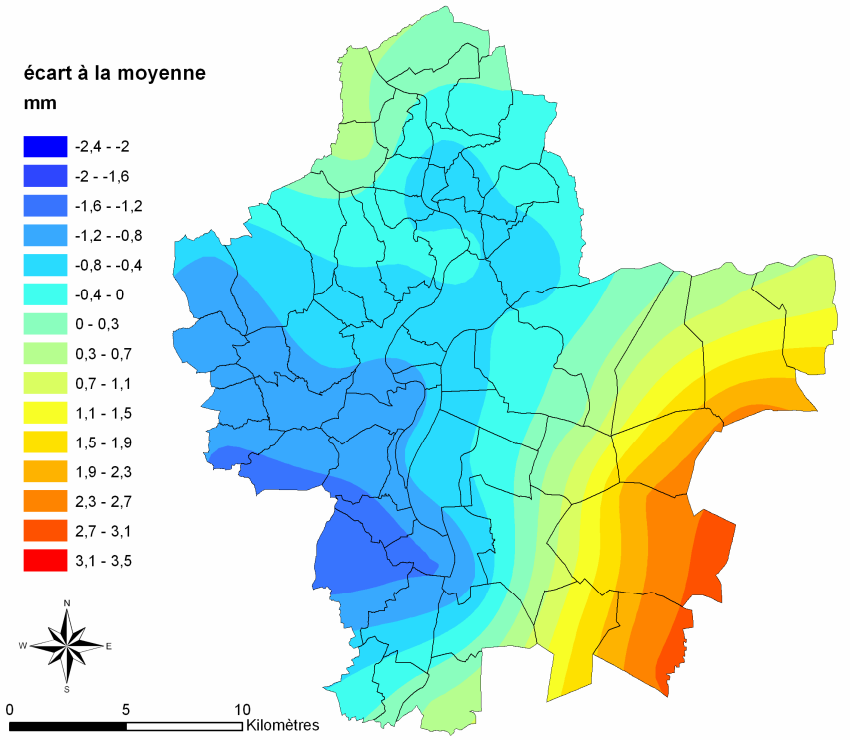


Figure 3.18 : Krigeage ordinaire des écarts au cumul moyen des épisodes remarquables en termes de durée (45,4 mm)

2.4.3 En termes d'intensité maximale en 18 minutes

La distribution spatiale aléatoire des épisodes remarquables se retrouve une nouvelle fois pour les pluies les plus intenses en 18 minutes, mais de manière encore plus exacerbée. En effet, ces épisodes peuvent se manifester d'une manière extrêmement locale, comme

lors de la pluie du 07 août 1997 (fig. 3.19), à la différence des autres types d'événements qui touchaient des zones de l'agglomération relativement étendues sur plusieurs centaines de kilomètres carrés. Cet épisode qui a touché le nord-ouest du Grand Lyon est particulièrement frappant et significatif. Il a été relevé 52,2 mm au pluviomètre de Salvagny, 11,8 mm à celui de Neuville, seulement 7,4 mm et 7,6 mm respectivement à Poleymieux et à Montanay, et aucune précipitation sur les autres postes de l'agglomération.

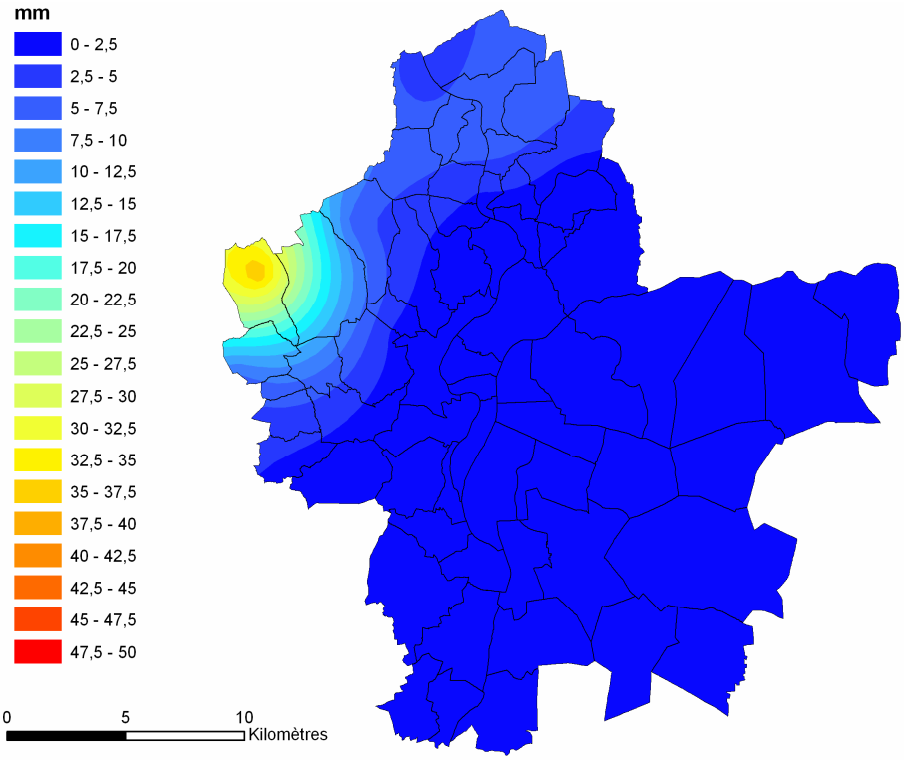


Figure 3.19 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 07 août 1997

Durant ce type de précipitations, les pluies sont donc très localisées, et des gradients pluviométriques extrêmement forts sont observés. Lors du cumul de ces épisodes, les gradients sont de l'ordre de plusieurs dizaines de millimètres sur moins de cinq kilomètres. Par exemple, pendant l'épisode du 07 août 1997, le gradient a été de 50 mm en 6 km (52, 2 mm au pluviomètre de Salvagny et aucune précipitation à celui de Champagne, distant de 6 km).

Ainsi, toutes les parties de l'agglomération sont concernées (tableau 3.10). Mais cette fois-ci, l'est de l'agglomération ne ressort pas d'une manière aussi franche, en étant concerné dans 33 % des cas seulement. Toutes les zones sont concernées d'une manière relativement égale en ce qui concerne ces épisodes (tableau 3.11). Les interpolations spatiales de tous les cumuls d'eau de ces épisodes remarquables en termes d'intensité maximale se trouvent en annexe 6.

Pluie	Zone la plus touchée
05/07/1993	centre-est
09/09/2002	nord-ouest
29/06/1993	centre-est
01/07/1993	sud-est
04/08/2004	est
14/05/1988	nord
31/07/1994	nord-ouest
08/08/1995	ouest
10/06/2000	nord-ouest
30/06/1997	sud-est
07/09/1995	centre-est
23/07/2004	nord
12/05/1993	ouest
21/08/1992	sud-est
19/09/2002	centre
08/06/1996	nord-ouest
24/08/1995	sud
29/07/2005	nord-ouest
29/07/1990	centre-sud
16/06/1988	sud-est
29/07/1996	nord
07/08/1997	nord-ouest
12/05/1995	ouest
20/08/2000	sud
19/06/1994	nord-ouest

Tableau 3.10 : Zones de l'agglomération les plus arrosées durant les épisodes remarquables en termes d'intensité maximale en 18 minutes

Zone de l'agglomération arrosée	%
nord	38
sud	29
est	33
ouest	38
centre	21

Tableau 3.11 : Proportion des zones de l'agglomération les plus arrosées (%) durant les épisodes remarquables en termes d'intensité maximale en 18 minutes

Une fois encore, le gradient pluviométrique croissant ouest / est se dégage lorsque l'on étudie les écarts aux cumuls moyens de ces pluies. En outre, une accentuation se dégage particulièrement sur le nord et le couloir du val de Saône, avec 3 mm environ (fig. 3.20).

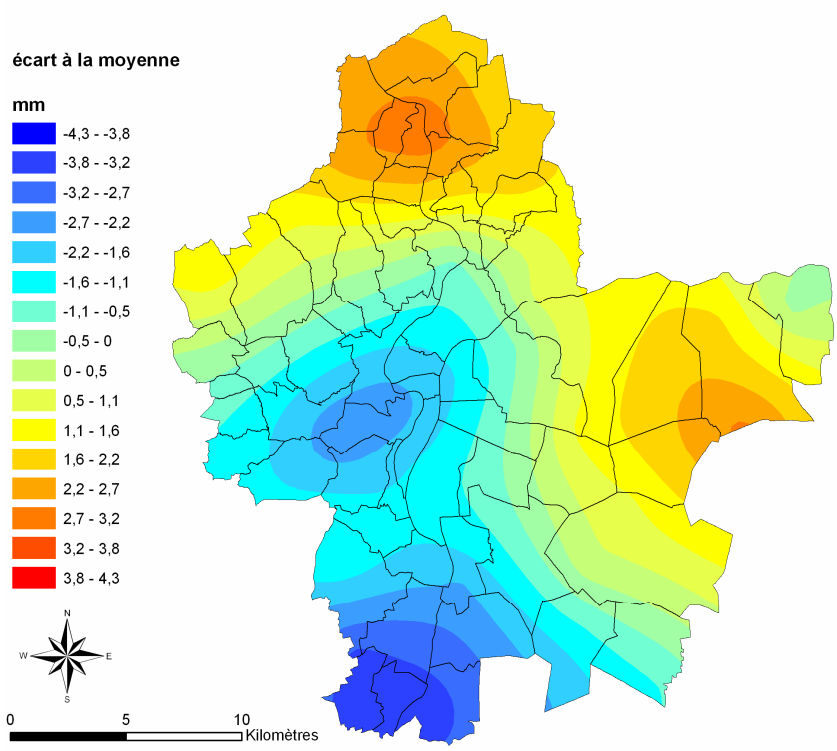


Figure 3.20 : Krigeage ordinaire des écarts au cumul moyen des épisodes remarquables en termes d'intensité maximale (15,17 mm)

Cette observation peut être mise en parallèle avec les déclarations de J. P. Vigneau (2005), qui assure qu' « au dessus des grandes cités, les plus fortes averses tombent plutôt à l'aval : ainsi sur le nord-est et dans la banlieue voisine, lors des orages arrivant du sud-ouest ». Cependant, dans le cas du Grand Lyon, si cela se manifeste au niveau de l'écart moyen des hauteurs d'eau précipitées, cela n'est pas réellement le cas à l'échelle de l'épisode. Au contraire, en observant attentivement le cumul d'eau de ces épisodes remarquables pour leur intensité maximale, il peut être remarqué comme des « couloirs » de plus fortes hauteurs d'eau. En outre, ces couloirs, qui semblent orientés selon un axe sud-ouest / nord-est, se manifestent sur l'ensemble de l'agglomération, aussi bien sur le nord-ouest, comme le 09 septembre 2002 (fig. 3.21), que sur le centre (le 07 septembre 1995 – fig. 3.22), ou encore sur le sud-est (le 21 août 1992 – fig. 3.23).

Ainsi, les cumuls de ces épisodes pluvieux semblent traduire un déploiement préférentiel dans l'espace. Afin de statuer, une analyse variographique des hauteurs d'eau cumulées va être menée pour déterminer d'éventuelles directions préférentielles.

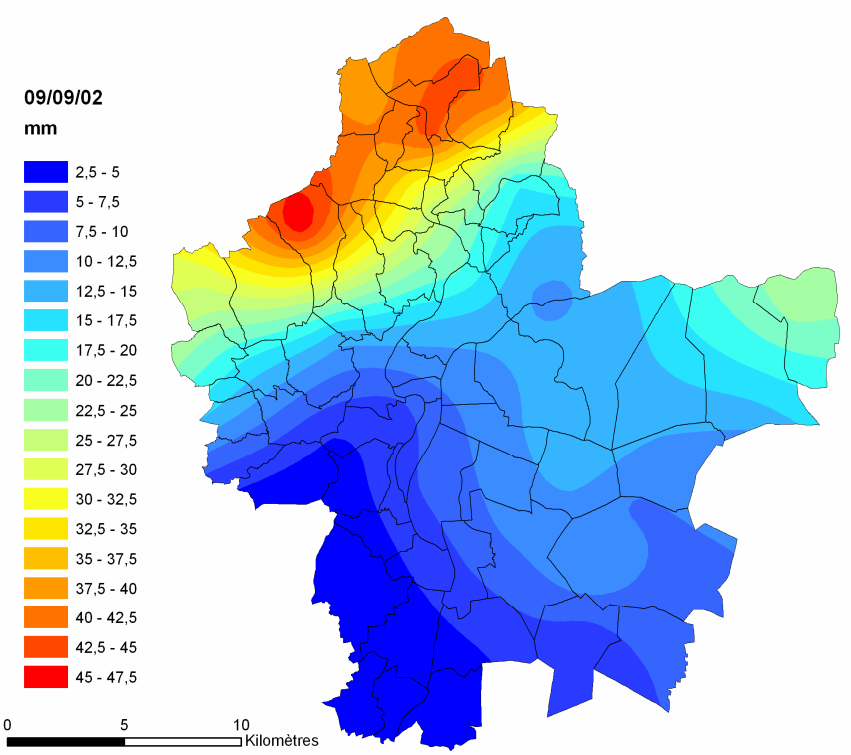


Figure 3.21 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 09 septembre 2002

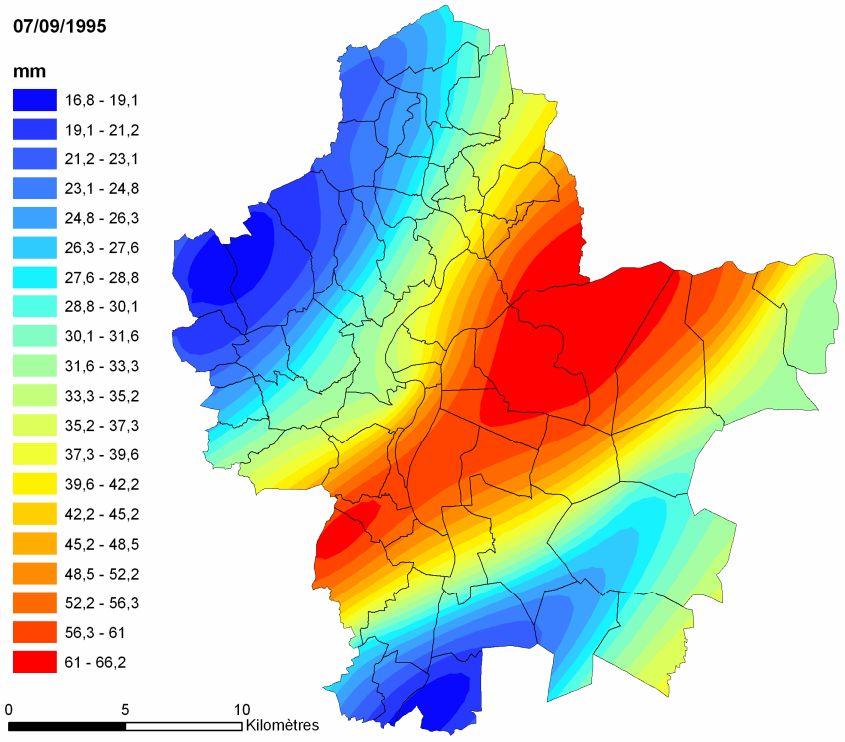


Figure 3.22 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 07 septembre 1995

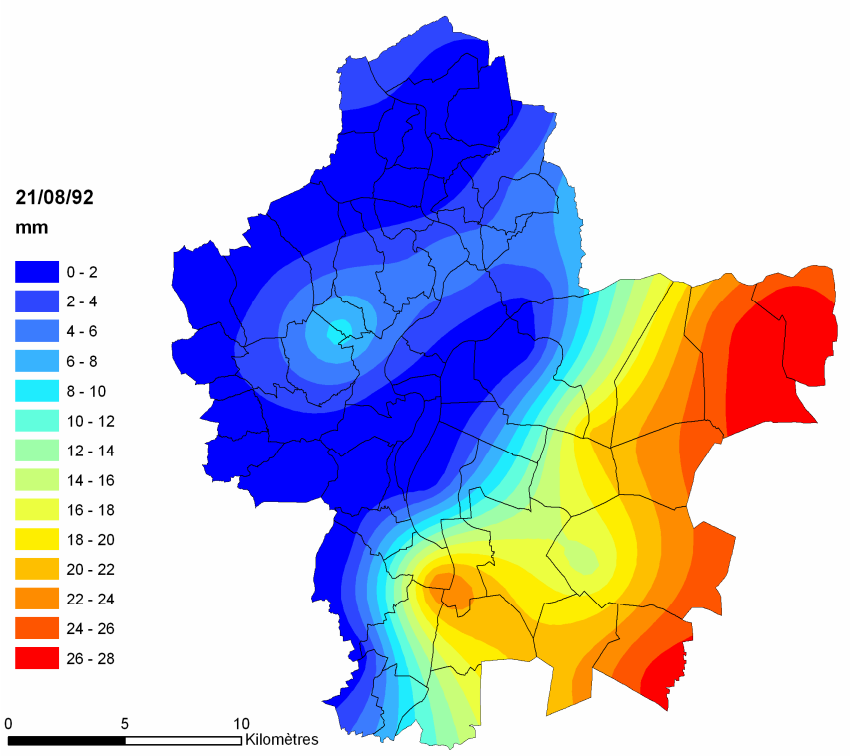


Figure 3.23 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 21 août 1992

2.5 L'analyse variographique pour la mise en évidence de tendances significatives dans la distribution des pluies

Il a été vu lors de la présentation de la méthode d'interpolation spatiale par krigeage que le semi variogramme dépend du vecteur de translation *h* entre les points *s* et *s+h*. Comme tout vecteur, le vecteur de translation *h* possède de l'information sur la distance entre ces deux points *s* et *s+h* par le biais de sa norme. Il contient en outre des renseignements sur son orientation, en fonction de la position respective de *s* et *s+h* dans le plan euclidien. Ainsi, un semi variogramme est dit isotrope s'il ne dépend que de la norme de *h*, mais s'il dépend aussi de l'orientation de son vecteur de translation, il est alors dit anisotrope (Goovaerts, 1997 ; Ramos-Domingues, 2002). L'anisotropie est donc une caractéristique d'un processus stochastique aléatoire qui présente une auto-corrélation plus forte dans une certaine direction du plan (Arnaud et Emery, 2000 ; Aubry et Piégay, 2001 -

Oliveau, 2010). Ainsi, la forme du semi variogramme empirique ainsi que ses relations spatiales statistiques (pépite, palier et portée) prennent des valeurs différentes en fonction des orientations dans le plan (Nepel, 1997). Une anisotropie caractérise donc « un phénomène qui se déploie préférentiellement dans certaines directions de l'espace » (Arnaud et Emery, 2000). L'étude des paramètres des semi variogrammes expérimentaux des cumuls pluvieux des épisodes remarquables dans différentes orientations du plan par pas de 2°, notamment lorsque la portée est maximale , a ainsi permis de déterminer le déploiement préférentiel de leur distribution pluvieuse. Un exemple concret va être exposé en s'appuyant sur l'épisode remarquablement intense du 07 septembre 1995.

2.5.1 *Etude de cas de l'anisotropie de la hauteur d'eau de l'événement du 07 septembre 1995*

La figure 3.24 présente le variogramme de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode pluvieux du 07 septembre 1995. Dans ce cas présent, aucune discrimination n'a été réalisée en fonction de l'orientation du vecteur de translation *h*, il est alors dit « omnidirectionnel » (aussi parfois appelé «toutes directions confondues » ou « tous azimuts »).

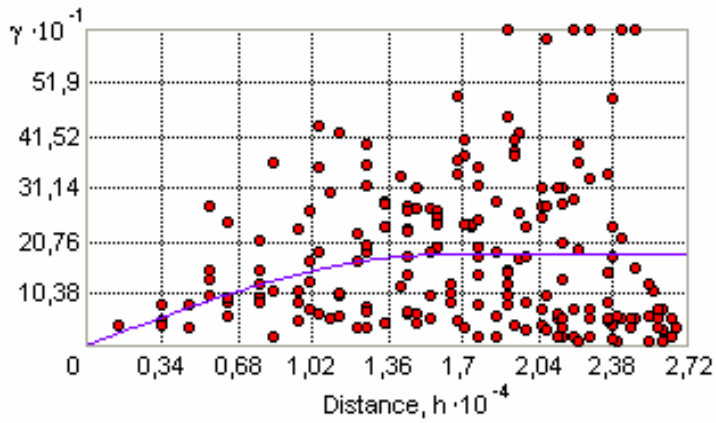


Figure 3.24 : Variogramme omnidirectionnel du cumul pluvieux du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique (distance en mètres)

Cependant, lorsque l'on s'intéresse à ce variogramme dans différentes orientations du plan, la portée varie, révélant son anisotropie, alors que la pépite reste nulle, et que le palier ne varie pas, et reste peu différent du modèle omnidirectionnel. Cela caractérise ainsi un déploiement préférentiel du cumul pluvieux de l'épisode du 07 septembre 1995. En effet, la portée est maximale avec une distance de 26,17 km, pour une orientation de 36°N à 58°N

(fig. 3.25). Au contraire, cette dernière est minimale avec une distance de 7,68 km pour une orientation de 102°N (fig. 3.26).

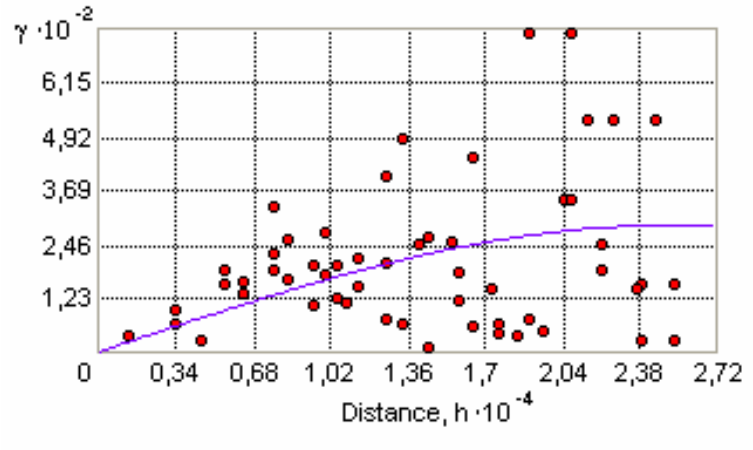


Figure 3.25 : Variogramme selon l'orientation de 40°N du cumul pluvieux du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique (distance en mètres). Dans ce cas, la portée de 26,17 km est maximale.

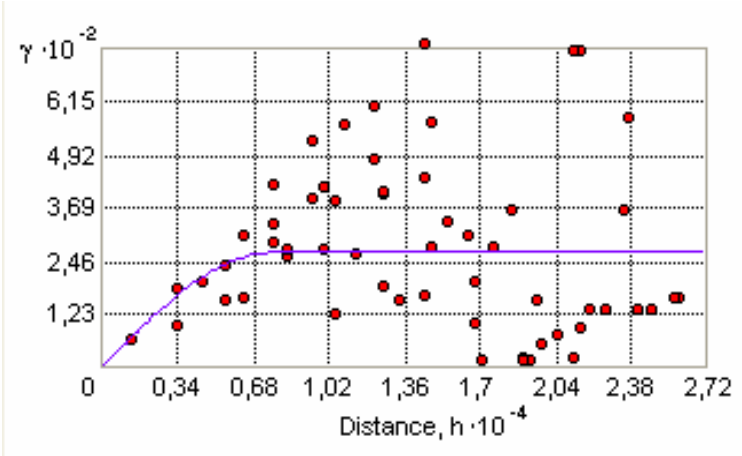


Figure 3.26 : Variogramme selon l'orientation de 102°N du cumul pluvieux du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique (distance en mètres). Dans ce cas, la portée de 7, 68 km est minimale.

La figure 3.27 nous renseigne précisément sur la variation de la portée en fonction de l'angle d'orientation du vecteur de translation. Nous retrouvons bien les portées maximales pour des angles de 36°N à 58°N, et la portée minima le pour 102°N.

Ce type d'analyse a été mené pour tous les variogrammes des hauteurs d'eau cumulées des épisodes remarquables sélectionnés et les résultats sont maintenant présentés.

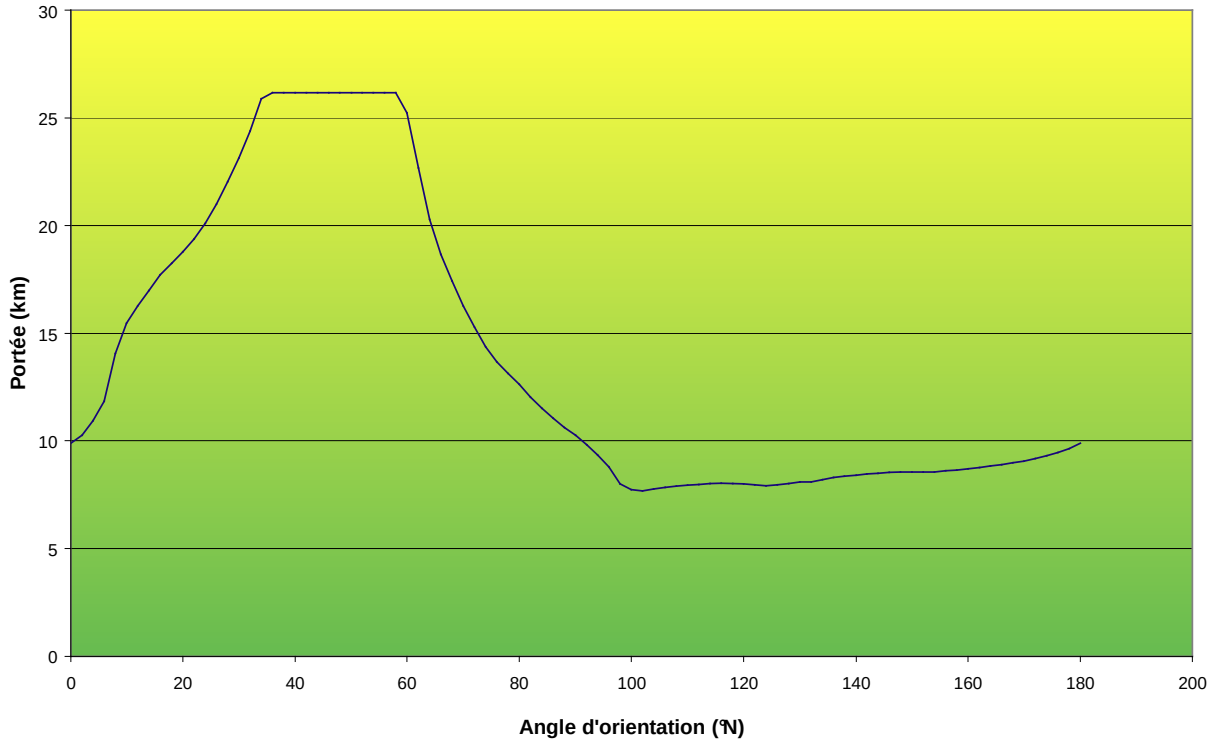


Figure 3.27 : Portée en fonction de l'angle d'orientation du vecteur de translation

2.5.2 Résultats de l'anisotropie des épisodes remarquables

- *En termes de hauteur d'eau totale précipitée*

L'anisotropie des variogrammes des cumuls des épisodes remarquables en fonction de la hauteur d'eau précipitée a été étudiée comme décrit précédemment. Il en ressort deux tendances qui se dégagent clairement (tableau 3.12). 84 % des épisodes présentent un déploiement préférentiel compris entre 0°N et 90°N, c'est-à-dire avec une orientation SO/NE. Plus précisément, leur orientation moyenne est de 37°, avec un écart type de 24°. Les 16 % des épisodes restants présentent une orientation SE/NO de 139°N, avec un écart type de 26°.

Pluie	Déploiement préférentiel (°N)
01/12/2003	130
15/04/2005	16
22/09/1993	11
12/11/1996	44
22/10/1999	28
28/09/1991	73
23/11/2002	39
07/10/1993	20

04/10/1995	12
14/07/2001	27
01/05/2002	12
21/06/1997	157
25/10/2004	38
05/07/1999	77
12/09/1995	13
07/07/1996	18
05/10/1993	18
12/09/1994	80
05/11/1994	34
17/08/2004	87
18/05/1996	102
03/11/1989	168
13/03/2004	62
12/10/2000	22
25/04/1989	49

Tableau 3.12 : Déploiement préférentiel des épisodes remarquables en termes de hauteur totale d'eau précipitée

- *En termes de durée*

Les épisodes remarquables en termes de durée présentent des déploiements préférentiels similaires aux épisodes précédents (tableau 3.13). 76 % de ces épisodes présentent une auto corrélation plus forte suivant une orientation SO/NE, précisément de 41ℕ, avec un écart type de 21ℕ. 24 % de ces épiso des remarquables restants adoptent un déploiement préférentiel de 148ℕ (écart type de 16 ℕ).

Pluie	Déploiement préférentiel (ℕ)
15/04/2005	16
01/05/2002	12
07/10/1993	20
01/12/2003	130
23/11/2002	39
25/04/1989	49
07/07/1996	18
26/03/1999	54
12/09/1995	13
07/04/2005	77
15/10/1996	76
22/09/2001	122
28/09/1991	73
16/07/2002	36
29/09/1988	156
10/05/1989	52
21/06/1997	157
25/11/1996	52
16/10/2002	14
24/10/1999	46

28/10/1990	156
20/11/1990	46
10/10/1988	31
10/06/1992	64
18/09/1995	166

Tableau 3.13 : Déploiement préférentiel des épisodes remarquables en termes de durée

- *En termes d'intensité maximale en 18 minutes*

Le même genre de constat peut être fait pour les épisodes remarquables en termes d'intensité maximale moyenne en 18 minutes. La plupart de ces épisodes (76 %) ont un déploiement préférentiel SO/NE de 40°N avec un écart type de 22°N. Les 24 % restants affichent une auto corrélation plus forte suivant une orientation de 149°N, avec un écart type de 23°N (tableau 3.14).

Pluie	Anisotropie (°N)
05/07/1993	34
09/09/2002	61
29/06/1993	57
01/07/1993	23
04/08/2004	161
14/05/1988	41
31/07/1994	36
08/08/1995	164
10/06/2000	148
30/06/1997	10
07/09/1995	43
23/07/2004	77
12/05/1993	135
21/08/1992	17
19/09/2002	108
08/06/1996	26
24/08/1995	7
29/07/2005	30
29/07/1990	33
16/06/1988	60
29/07/1996	87
07/08/1997	10
12/05/1995	179
20/08/2000	53
19/06/1994	48

Tableau 3.14 : Déploiement préférentiel des épisodes remarquables en termes d'intensité maximale moyenne en 18 minutes

- *Conclusion globale des déploiements préférentiels des épisodes remarquables*

Les épisodes remarquables affichent clairement dans la majorité des cas des déploiements préférentiels orientés selon un axe SO/NE. Dans 84 % des cas pour les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée (37°N) et dans 76 % des cas pour les épisodes remarquables en termes de durée et d'intensité maximale en 18 minutes (respectivement 41°N et 40°N) (tableau 3.15).

Types d'épisodes remarquables	Proportion des cas	Déploiement préférentiel
Hauteur d'eau cumulée	84 %	37°N
Durée	76 %	41°N
Intensité maximale	76 %	40°N

Tableau 3.15 : Caractéristiques privilégiées des déploiements préférentiels des épisodes remarquables

La grande majorité des épisodes remarquables présentent une auto corrélation plus forte le long d'un axe SO/NE d'une quarantaine de degré environ. Cependant, cela ne présage en rien de la direction empruntée par ces épisodes et ne nous renseigne pas sur leur trajectoire. L'étude des données pluviométriques à pas de temps fin va permettre de caractériser ces trajectoires. En effet, le réseau pluviométrique au sol du Grand Lyon permet d'accéder aux données avec un pas de temps de six minutes. L'exploitation de ces données par le biais de hauteurs d'eau cumulées à l'échelle de l'épisode a déjà livré beaucoup d'informations, que ce soit par spatialisation, ou plus précisément d'un point de vue géostatistique par une analyse variographique poussée. Cependant, l'utilisation d'un pas de temps fin va permettre une caractérisation plus précise de l'aléa pluvial, et plus particulièrement en ce qui concerne les directions suivies par les épisodes remarquables.

2.6 Analyse descriptive de la dynamique spatiale et temporelle des épisodes

L'étude des précipitations au pas de temps de six minutes permet une caractérisation temporelle mais aussi spatiale très fine de l'aléa pluvial. En effet, une série d'interpolations à ce pas de temps permet de suivre dans l'espace et le temps l'avancée des noyaux pluvieux

et leur distribution sur le territoire du Grand Lyon. Bien que ce mode d'analyse requière un temps considérable consacré à la création de cartes pour chaque pas de temps de six minutes, il est une source d'information considérable pour la connaissance de l'aléa pluvial. Par exemple, l'épisode du 1er décembre 2003 qui est le plus remarquable en termes de hauteur d'eau cumulée a duré 34h36. Il a donc été nécessaire de réaliser 346 interpolations aux pas de temps de six minutes. Pour l'ensemble des épisodes remarquables, 15000 interpolations spatiales environ ont été réalisées à l'aide du SIG. Un exemple représentatif de ces interpolations va maintenant être exposé au travers de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993.

2.6.1 Etude de cas de la spatialisation à pas de temps fin de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993

L'épisode pluvieux du 29 juin 1993 est la troisième pluie la plus intense en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes avec 112,7 mm/h. Cet événement a duré 01h36. Son déploiement préférentiel est de 57°N. Ce pendant, nous ignorons si cet épisode est arrivé sur le Grand Lyon par le sud-ouest ou le nord-est. L'étude fine de cet épisode à l'aide d'interpolation spatiale par pas de temps de six minutes va permettre de dégager des informations sur sa trajectoire. Pour cela, seize spatialisations du début à la fin de cet événement ont été créées. L'ensemble de ces interpolations spatiales sont présentes en annexe 7, et la figure 3.28 regroupent les quatre pas de temps les plus pertinents pour l'étude de la trajectoire de cet épisode pluvieux.

Le déplacement d'un noyau de précipitation est identifiable sur les interpolations successives. Ici, le terme « noyau » est emprunté au vocable des géographes climatologues français, à A. Douguedroit notamment (2008 et 2010). D'un diamètre de cinq kilomètres environ, il est présent dès 15h30 sur le sud-ouest de l'agglomération. Il adopte une trajectoire linéaire durant les pas de temps suivant en passant sur le cœur de la communauté urbaine, pour quitter le Grand Lyon par le nord-est à 15h48.

La trajectoire empruntée par ce noyau est conforme à l'étude de l'anisotropie de la hauteur totale d'eau précipitée qui indiquait 57°N de déploiement préférentiel. L'étude fondée sur des interpolations à pas de temps fin conforte ainsi l'analyse variographique et l'auto corrélation spatiale, mais apporte en outre une dimension supplémentaire en fournissant des indications sur la trajectoire de l'épisode pluvieux, et non plus seulement sur son orientation.

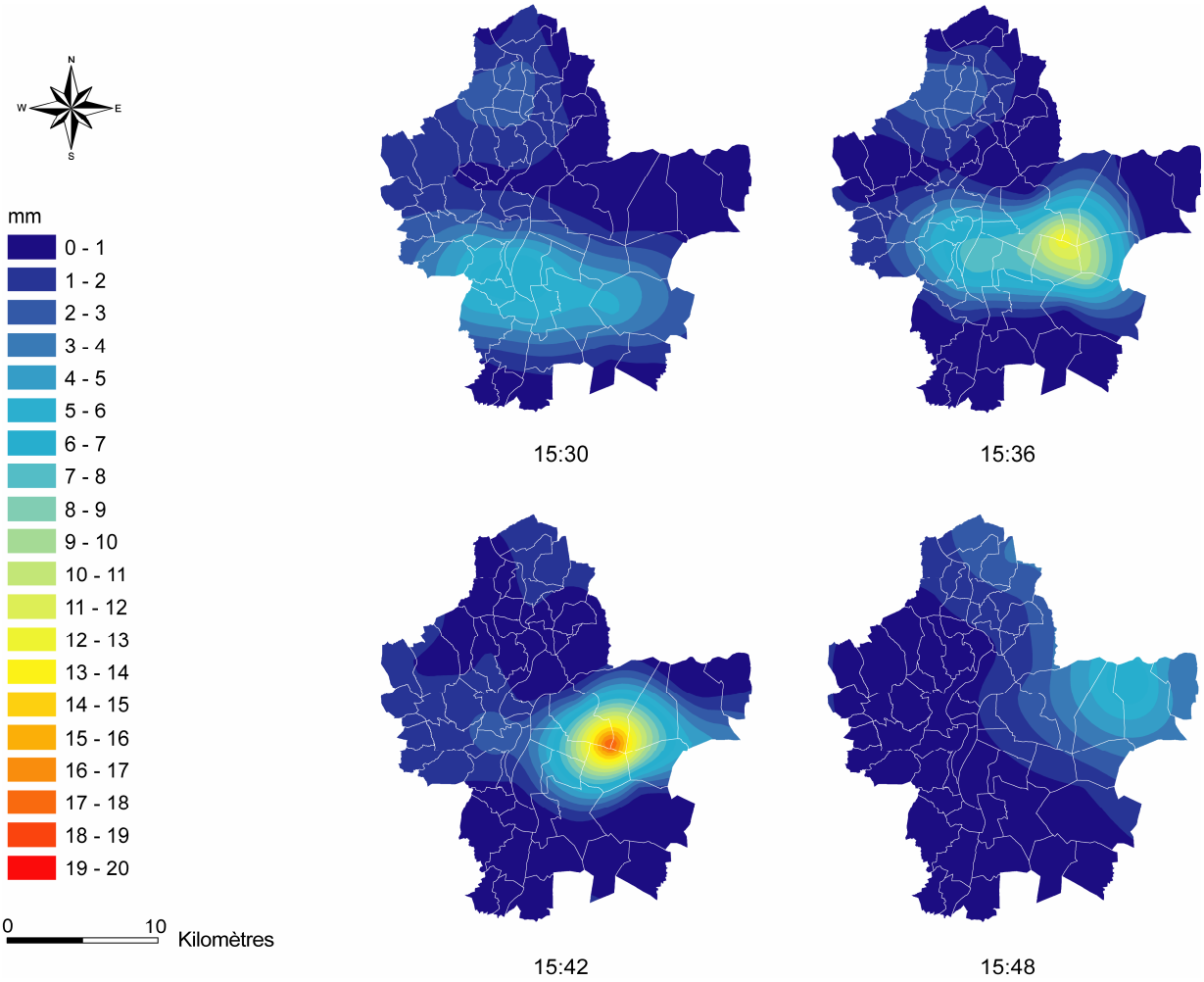


Figure 3.28 : Suivi du déplacement du noyau pluvieux de forte intensité de l'épisode du 29 juin 1993, de 15h30 à 15h48

Cette méthodologie fournit donc une série de cartes à l'aide de laquelle le déplacement des noyaux de forte intensité peut être suivi précisément par pas de temps de six minutes. Cependant, lors de communication orale, cette suite de carte n'est pas vraiment visuelle. Ainsi, à l'aide de logiciels appropriés tels que *Adobe Premiere*®, une animation ayant comme base la suite de carte peut être créée, sur laquelle le déplacement des noyaux pluvieux est représenté de manière fluide. Pour cela, il est nécessaire de faire apparaître chacune de ces cartes quelques secondes, et de placer des transitions en fondues entre chaque afin de donner une impression de mouvement continu. Cette animation sous forme de fichier .wmw, impossible à retraduire sous format papier, se trouve être un élément très pertinent et convaincant lors de communications orales, devant des chercheurs et encore plus devant des acteurs opérationnels.

2.6.2 Résultats des interpolations à pas de temps fin et confrontation à l'analyse variographique

L'analyse de l'aléa pluvial à l'aide d'interpolations spatiales à pas de temps fin confirme les déploiements préférentiels précédemment mis en évidence par l'analyse variographique. Les spatialisations apportent en outre une information sur la trajectoire des épisodes pluvieux. Ainsi, tous les événements qui présentent un déploiement préférentiel compris entre 0°N et 90°N ont une trajectoire SO/NE ; et to us les épisodes pluvieux ayant un déploiement préférentiel de 90°N à 180°N ont une tr ajectoire SE/NO (tableau 3.16).

Types de pluies remarquables								
Intensité maximale			Hauteur totale			Durée		
Pluie	Déploiement préférentiel (°N)	Trajectoire	Pluie	Déploiement préférentiel (°N)	Trajectoire	Pluie	Déploiement préférentiel (°N)	Trajectoire
05/07/1993	34	SO/NE	01/12/2003	130	SE/NO	15/04/2005	16	SO/NE
09/09/2002	61	SO/NE	15/04/2005	16	SO/NE	01/05/2002	12	SO/NE
29/06/1993	57	SO/NE	22/09/1993	11	SO/NE	07/10/1993	20	SO/NE
01/07/1993	23	SO/NE	12/11/1996	44	SO/NE	01/12/2003	130	SE/NO
04/08/2004	161	SE/NO	22/10/1999	28	SO/NE	23/11/2002	39	SO/NE
14/05/1988	41	SO/NE	28/09/1991	73	SO/NE	25/04/1989	49	SO/NE
31/07/1994	36	SO/NE	23/11/2002	39	SO/NE	07/07/1996	18	SO/NE
08/08/1995	164	SE/NO	07/10/1993	20	SO/NE	26/03/1999	54	SO/NE
10/06/2000	148	SE/NO	04/10/1995	12	SO/NE	12/09/1995	13	SO/NE
30/06/1997	10	SO/NE	14/07/2001	27	SO/NE	07/04/2005	77	SO/NE
07/09/1995	43	SO/NE	01/05/2002	12	SO/NE	15/10/1996	76	SO/NE
23/07/2004	77	SO/NE	21/06/1997	157	SO/NE	22/09/2001	122	SE/NO
12/05/1993	135	SE/NO	25/10/2004	38	SO/NE	28/09/1991	73	SO/NE
21/08/1992	17	SO/NE	05/07/1999	77	SO/NE	16/07/2002	36	SO/NE
19/09/2002	108	SE/NO	12/09/1995	13	SO/NE	29/09/1988	156	SE/NO
08/06/1996	26	SO/NE	07/07/1996	18	SO/NE	10/05/1989	52	SO/NE
24/08/1995	7	SO/NE	05/10/1993	18	SO/NE	21/06/1997	157	SO/NE
29/07/2005	30	SO/NE	12/09/1994	80	SO/NE	25/11/1996	52	SO/NE
29/07/1990	33	SO/NE	05/11/1994	34	SO/NE	16/10/2002	14	SO/NE
16/06/1988	60	SO/NE	17/08/2004	87	SO/NE	24/10/1999	46	SO/NE
29/07/1996	87	SO/NE	18/05/1996	102	SE/NO	28/10/1990	156	SE/NO
07/08/1997	10	SO/NE	03/11/1989	168	SE/NO	20/11/1990	46	SO/NE
12/05/1995	179	SE/NO	13/03/2004	62	SO/NE	10/10/1988	31	SO/NE
20/08/2000	53	SO/NE	12/10/2000	22	SO/NE	10/06/1992	64	SO/NE
19/06/1994	48	SO/NE	25/04/1989	49	SO/NE	18/09/1995	166	SE/NO

Tableau 3.16 : Trajectoires des épisodes remarquables identifiées à l'aide des interpolations spatiales à pas de temps fin

Synthèse de la partie : des distributions et des trajectoires significatives à l'échelle de l'épisode pluvieux

Le premier chapitre de cette thèse est focalisé sur l'exploitation du réseau de mesure au sol en vue de l'amélioration de la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais. En plus de ses qualités de mesure indéniables précédemment évoquées, nous avons été amené à nous y intéresser en premier lieu car il s'agissait des seules données dont nous disposions au commencement de cette thèse. En effet, nous avons obtenu les données du radar météorologique par la suite. Cependant, l'exploitation d'un réseau de mesure au sol peut fournir des résultats très pertinents, pour peu que le réseau soit suffisament dense, et que les données soient accessibles à un pas de temps fin. Ainsi, les territoires dépourvus de radar météorologique peuvent être étudiés à l'aide d'un réseau de pluviomètres, et une caractérisation de l'aléa pluvial peut ainsi être menée, d'une manière peut-être pas aussi détaillée qu'à l'aide d'un radar météorologique, mais d'une façon tout de même assez poussée, comme ce premier chapitre en est l'exemple sur l'agglomération lyonnaise.

En effet, à l'échelle annuelle, un fort gradient croissant ouest - est se dégage sur le Grand Lyon. En moyenne, l'est de la communauté urbaine reçoit 300 mm de plus que l'ouest. Ce constat se retrouve à l'échelle saisonnière et mensuelle. Cependant, les analyses à l'échelle des épisodes pluvieux remarquables ne traduisent pas véritablement ce constat et les conclusions sont plus nuancées. Durant ces épisodes, tous les secteurs sont concernés par ces précipitations, aucun n'est systématiquement plus touché qu'un autre. De forts événements peuvent survenir sur l'ouest de l'agglomération sans concerner l'est, même si cette dernière zone est affectée dans la plupart des cas lors d'épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau et de durée.

L'analyse variographique des hauteurs d'eau a mis en évidence des déploiements préférentiels de ces épisodes remarquables. Globalement, une orientation d'une quarantaine de degré se manifeste. Or, si la variographie nous apporte des informations sur l'orientation préférentielle des épisodes, il a fallu recourir à des interpolations spatiales à pas de temps fin afin de statuer sur leurs directions. Ces très nombreuses interpolations ont permis de constater que la grande majorité de ces événements pluvieux remarquables provenaient du sud-ouest et suivaient une trajectoire rectiligne (Renard et Comby, 2007).

Afin de valider ces éléments qui proviennent de l'exploitation du réseau de mesure au sol du Grand Lyon, un outil de mesure complémentaire, le radar météorologique local, va maintenant être utilisé. Le radar météorologique local n'a jamais véritablement été utilisé sur le Grand Lyon. Ainsi, dans un premier temps, la qualité de cet instrument va être évaluée, pour ensuite pouvoir être utilisé par la suite dans la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais.

Chapitre 2

Le radar météorologique : un outil performant dont la qualité de mesure est à évaluer avant son utilisation dans la caractérisation de l'aléa pluvial

---

Partie 1 : Une qualité de mesure en constante progression pour une caractérisation fine des épisodes pluvieux

Le radar constitue dorénavant un outil indispensable à l'observation de l'atmosphère (Andrieu, 2002). En effet, la veille atmosphérique nécessite l'utilisation d'un certain nombre d'outils complémentaires. Les mesures au sol de réseaux pluviométriques donnent des informations précises, mais ponctuelles (cf. chapitre précédent). En dépit des densités actuelles des réseaux des grandes agglomérations, ces mesures éparses ne permettent pas de détecter un phénomène météorologique donné qui se produit entre deux stations pluviométriques. Parallèlement, l'imagerie satellite fournit une couverture spatiale complète. Cependant, elle ne permet pas actuellement de mesurer les précipitations avec précision. Les radars météorologiques comblent les limites de ces deux techniques de mesure, en proposant une couverture complète et une quantification fine des précipitations.

En outre, les radars météorologiques élargissent la zone couverte par les réseaux de mesure au sol. Cela permet de les utiliser de manière opérationnelle dans des actions d'anticipation et de prévision de phénomènes pluvieux « à risque », à plus ou moins brève échéance, en fonction de la portée du radar. Cela est le cas dans de nombreuses agglomérations françaises, notamment pour une gestion dynamique du système d'assainissement. L'utilisation d'un radar météorologique en temps réel, couplé à une gestion du système d'assainissement en télégestion, permet de limiter les débordements liés au ruissellement urbain.

Le système *Calamar* du groupe Rhéa en est l'exemple le plus connu (Kapfer et Jacquet, 2010). Il est utilisé notamment dans les agglomérations de Marseille (Jacquet, 2007 ; Laplace et Guivarch, 2010) et de Nîmes, ou du département des Hauts-de-Seine

(Guillon et al., 2008). Ce système se veut adapté aux exigences opérationnelles et est un véritable outil d'aide à la décision. Il permet d'anticiper suffisamment les événements pluvieux afin de laisser aux gestionnaires un délai suffisant (de une à trois heures) pour intervenir sur le terrain. Les radars peuvent aussi être utilisés en temps différé, afin de reconstituer un événement pluvieux, et de coupler les données obtenues à un modèle hydrologique pour identifier les causes des dysfonctionnements et les sources de nuisances.

D'autres systèmes proposant des offres comparables à celles de *Calamar* existent. Les prinicpaux concurrents se nomment *Novimet* sur l'agglomération bordelaise par exemple (Testud, 2010), Météo-France et Egis Eau sur Saint-Etienne Métropole (Raymond et al., 2010), ou Alicime sur celle de Nancy (Faure et Auchet, 2002 ; Faure et al., 2005a). Cependant, l'agglomération lyonnaise se distingue par une absence de système de prévention par radar météorologique. Ainsi, ce chapitre est dédié à l'utilisation du radar météorologique local sur la communauté urbaine de Lyon, inexploité jusqu'à aujourd'hui, avec en premier lieu une évaluation de la qualité de mesure de ce dernier.

1. Principes de fonctionnement du radar météorologique et limites de la mesure

1.1 Principe de la mesure par radar

A la fin du XIXe siècle, Hertz a montré que les ondes électromagnétiques sont réfléchies par les objets. En conséquence, un appareil antiaérien de détection et de localisation par RADAR (RAdio Detection And Ranging) voit le jour en 1938. Lors de l'utilisation de ce dispositif, il apparaît que les systèmes nuageux font apparaître des échos parasites sur les écrans. Le radar météorologique résulte alors d'un développement dans lequel l'écho parasite du radar classique devient l'objet de la mesure. Ainsi, les principes de mesure du radar météorologique ont été établis dans les années 40. Depuis, les techniques ont considérablement évolué, avec une augmentation de la précision de la mesure grâce à des améliorations notables au niveau du matériel, des signaux, de la récupération des

données et de son traitement (Sauvageot, 1994). De manière générale, le radar émet des impulsions électromagnétiques de très courte durée. Ces impulsions vont heurter les précipitations qui seront rétrodiffusées en retour au radar. Il pourra de cette manière déterminer la position et l'intensité de ces dernières.

Cette partie va ainsi succinctement présenter les principes de la mesure des précipitations par radar météorologique, et plus précisément les trois principales phases de cette mesure : l'émission, la rétrodiffusion et l'estimation du taux de pluie.

1.1.1 Emission

La majorité des radars météorologiques sont des radars pulsés. Des ondes électromagnétiques sont transmises d'une antenne directionnelle en direction de l'atmosphère. Cette antenne tourne sur un axe vertical à une vitesse de 5°/s environ (Tabary, 2007). Les impulsions électromagnétiques produites par un oscillateur électronique forment un faisceau très fin de forme conique, avec une ouverture de l'ordre de 1° à 2° (fig. 4.1).

Le volume de l'atmosphère sondé par ce faisceau, couramment désigné par les termes « volume radar », « volume de résolution » ou « porte » augmente en taille et en altitude avec la distance. Ainsi, pour la plupart des radars, le volume sondé va de 0,001 km^3 à proximité du radar, à 1 km^3 à 200 km de ce dernier.

L'antenne directionnelle n'émet pas les impulsions à l'horizontale, mais selon un angle appelé « angle d'élévation de l'antenne » ou « angle de site ». Cet angle varie en général autour de 1°. En conséquence, le faisceau ne sonde pas l'atmosphère à une hauteur constante. Cette dernière augmente avec la distance au radar. Par exemple, pour un angle de 1°, à 50 km du radar, le faisceau se situera à 0 ,87 km d'altitude, à 1,74 km d'altitude à une distance de 100 km, et à une altitude de 3,49 km à une distance de 200 km. De ce fait, la portée de détection des radars est généralement de 220 km environ, alors que leur utilisation quantitative est de l'ordre de 100 km. De la même manière, le radar se doit d'être localisé à une distance comprise entre 20 et 50 km de la zone d'intérêt.

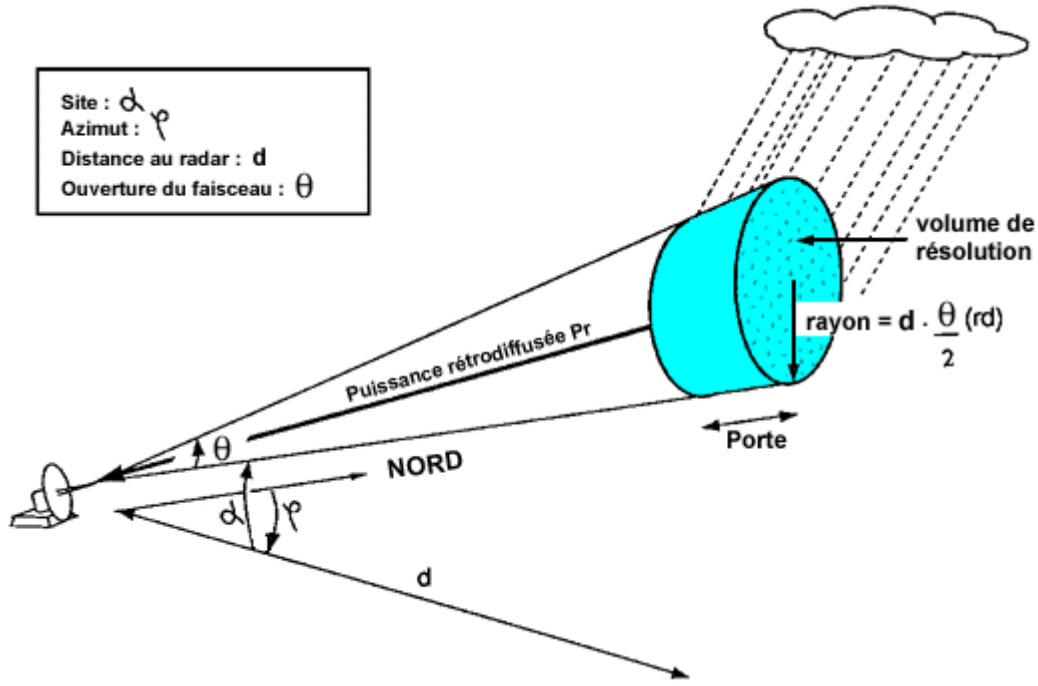


Figure 4.1 : Schéma de principe de propagation des ondes électromagnétiques (source : www.alicime.com)

Les radars se différencient selon leurs fréquences et leurs longueurs d'onde. Ces dernières constituent la « bande » du radar. Les bandes les plus couramment rencontrées sont les bandes S, C et X (tableau 4.1). Le choix de la longueur d'onde d'un radar est fonction du type de précipitations à observer. Dans les régions où les précipitations fortement intenses sont fréquentes, un radar à bande S de longueur d'onde d'une dizaine de centimètre est nécessaire. Aux moyennes latitudes, les radars à bande C sont efficaces pour un coût de fabrication moins élevé. Les radars à bande X de longueur d'onde de 3 cm environ sont peu onéreux mais souffrent de phénomènes d'atténuation par les précipitations qui rendent leur utilisation hasardeuse et leurs estimations imprécises (Anagnostou et al., 2009 ; Pujol et al., 2009 ; Van Baelen et al., 2009).

Bande du radar	Fréquence	Longueur d'onde
UHF	300 – 1000 MHz	1 – 0,3 m
L	1000 – 2000 MHz	0,3 – 0,15 m
S	2000 – 4000 MHz	15 – 7,5 cm
C	4000 – 8000 MHz	7,5 – 3,75 cm
X	8000 – 12500 MHz	3,75 – 2,4 cm

K	26,5 – 40 GHz	1,13 – 0,75 cm
W	94 GHz	0,30 cm

Tableau 4.1 : Fréquence et longueur d'ondes des différents types de radar (WMO, 2008)

1.1.2 Rétrodiffusion

Les impulsions d'énergie électromagnétique sont absorbées et réfléchies par les cibles rencontrées dans l'atmosphère. Une partie de l'énergie est rétrodiffusée vers la partie réceptrice du radar.

En effet, la quantification des précipitations par radar s'appuie sur la capacité des hydrométéores, qu'ils soient sous forme de pluie, de flocons de neige ou de cristaux de glace, à rétrodiffuser les ondes du radar vers son antenne. En connaissant l'angle de site du faisceau radar et son azimut, la position de la cible dans l'espace est déterminée. La puissance du signal retournée au radar est fonction de la concentration et de la taille des gouttes constituant la cible, de la forme :

$$p_r(u) = C\frac{Z(u)}{\rho^2}$$

Avec P_r : puissance rétrodiffusée vers le radar en provenance du point *u* situé à la distance ρ du radar

C : constante regroupant l'influence des caractéristiques du radar, notamment sa longueur d'onde, sa puissance d'émission et son ouverture du faisceau

Z : « facteur de réflectivité radar », encore appelé « réflectivité radar ». Ce facteur est indépendant du type de radar. Il représente la capacité de diffusion de l'ensemble des gouttes d'eau qui forment la cible atmosphérique (Andrieu, 2002).

Comme les ondes électromagnétiques voyagent à la vitesse de la lumière ($2{,}99.10^8$ m/s), la distance de la cible peut être déterminée en mesurant le temps écoulé entre l'émission et la rétrodiffusion.

1.1.3 Passage du facteur de réflectivité au taux de pluie

Le facteur de réflectivité Z traduit la capacité de la cible à renvoyer l'énergie qu'elle reçoit par le radar lors de l'émission des impulsions électromagnétiques. Il dépend de la distribution granulométrique des précipitations. Z est mesuré selon une échelle logarithmique (en décibels de Z ou dbZ) et correspond à la somme des puissances sixièmes des diamètres de toutes les gouttes comprises dans une porte du faisceau (Faure, 1993).

Le passage du facteur de réflectivité (Z en mm^6/m^3) en intensité de pluie (R en mm/h) repose sur des relations empiriques de type $Z = a R^b$, fondées sur la distribution et la taille des gouttes dans un volume donné (Tabary, 2007). A l'échelle mondiale, la relation la plus fréquemment utilisée est celle de Marshall-Palmer (1948), avec a = 200 et b = 1,6. Nous obtenons ainsi la relation $Z = 200 R^{1,6}$. Cette relation, notamment utilisée par Météo-France, s'adapte bien aux pluies stratiformes. Des relations pour les situations de neige, de pluies tropicales ou de pluies convectives ont aussi été trouvées. Par exemple, pour ces dernières, Jones (1955) a proposé une relation Z-R de la forme $Z = 486 R^{1,37}$ et Sims (1964) une relation $Z = 446 R^{1,43}$.

1.2 Erreurs classiques de la mesure des précipitations par radar météorologique

La mesure radar est une mesure indirecte et délicate qui repose sur les principes énoncés précédemment. Cette mesure peut être influencée et perturbée par des phénomènes naturels et anthropiques dont il est nécessaire de tenir compte lors de l'utilisation de données radars.

1.2.1 Echos fixes

Les échos fixes (encore appelés échos de sol) sont provoqués par l'interception du faisceau radar par les reliefs. Ils peuvent aussi apparaître à faible distance du radar à cause

de l'interception du faisceau par des obstacles anthropiques. Un dernier cas de figure peut se présenter lors de l'impact des lobes secondaires du faisceau radar avec le sol. Les échos provoqués par le relief sont en général bien localisés. Il est donc nécessaire de repérer les pixels affectés par ces échos pour les filtrer afin qu'ils ne viennent pas troubler la mesure par des données erronées.

En conséquence, Météo-France a développé un outil afin de les supprimer automatiquement. Cependant, cet éliminateur d'échos fixes rend plus difficile leur localisation. En effet, il remplace les fortes valeurs qui caractérisent ces échos par des valeurs très faibles qui apparaissent souvent comme des zones sans pluie au sein des zones pluvieuses. « L'efficacité de l'EEF de Météo-France avant 2007 dépendait fortement du taux de précipitation sur les reliefs et son action était donc assez fluctuante dans le temps » (Faure, 2008).

1.2.2 Masques

Les masques correspondent à une sous-estimation des précipitations en arrière des reliefs qui ont intercepté une partie plus ou moins considérable du faisceau radar. Leur valeur moyenne permet de les caractériser, mais dans le détail le taux de sous-estimation dépend du développement vertical des précipitations et de leur profil vertical de réflectivité. En effet, lorsque la partie inférieure du faisceau est masquée, moins les pluies sont développées en altitude, moins la part restant disponible du faisceau peut les détecter. Il s'ensuivra alors une sous-estimation plus importante que lorsque les pluies sont bien développées en altitude.

1.2.3 Propagation anormale

A grande distance du radar, il arrive que l'on puisse observer des échos de sol intermittents liés à une propagation anormale du faisceau radar. Ce faisceau est alors incurvé vers le sol. Cette configuration est provoquée par une forte inversion de la température en basse atmosphère (généralement en situation anticyclonique), ce qui entraîne un effet particulier sur le radar. En effet, lorsqu'une couche d'air chaud se superpose à une couche d'air beaucoup plus froid, les ondes électromagnétiques du radar ne peuvent pénétrer ces couches chaudes. Ces ondes sont alors réfléchies vers le sol, ce qui provoque un signal de retour erroné vers le radar. Les faux échos sont les plus fréquents par temps clair, de préférence tôt le matin. Ils disparaissent habituellement vers le milieu de la journée.

1.2.4 *Effet du PVR à grande distance*

La réflectivité des hydrométéores varie avec l'altitude et on représente cet effet à l'aide d'un profil vertical de réflectivité (PVR - Kirstetter, 2008). Or, lorsque l'on s'éloigne du radar, le diamètre et l'altitude du faisceau d'ondes augmentent. À grande distance, le faisceau intègre alors les précipitations sur une grande altitude, ce qui rend le profil vertical de réflectivité moins fiable. Il s'ensuit une mesure de la pluie moins représentative.

1.2.5 *Dépassement du faisceau et remplissage partiel*

Au-delà d'une certaine distance, une fraction importante du faisceau radar passe au dessus des zones pluvieuses. On observe donc en général une décroissance de la mesure radar, et consécutivement une sous-estimation des précipitations, qui augmente avec la distance au radar. En effet, l'altitude des précipitations varie selon le type de précipitations, de quelques centaines de mètres à plus de dix kilomètres pour les cellules convectives. Dans la pratique, on estime que ces effets sont limités à moins de 80 à 100 km du radar. Au-delà de 100 km on observe en général une décroissance rapide de la mesure moyenne du radar, mais les cellules convectives fortement développées verticalement peuvent rester bien visibles jusqu'à plus de 200 km, voire 250 km du radar (Faure, 2008).

1.2.6 *Effet de bande brillante*

L'effet de « bande brillante » est un phénomène particulier à signaler. En effet, lorsque le faisceau radar atteint l'altitude de l'isotherme 0℃, il se manifeste une très forte et une très rapide augmentation de la réflectivité. Ce phénomène est lié à un changement de phase. Ainsi, nous assistons à la fonte des hydrométéores qui passent de la forme solide à la forme liquide, provoquant un pic de réflectivité associé à la couche de fusion (Andrieu, 2002).

Cela se traduit sur les images par un renforcement concentrique des échos autour du radar. Ce renforcement étant d'autant plus marqué qu'il se produit près du radar et donc que l'altitude de l'isotherme 0℃ est faible. L'estimation des précipitations est ainsi rendue plus délicate et moins fiable dans la zone marquée par cette bande brillante, et même parfois au-delà. En effet, cela se traduit nettement sur les images par un anneau de forte réflectivité autour du site du radar. En complément, lorsque l'isotherme 0℃ se situe en dessous de l'altitude du radar, le radar détecte de la neige. Dans cette configuration, la mesure radar peut être grandement perturbée.

1.2.7 Atténuation de l'énergie du faisceau

Les radars de type bande C sont sensibles au phénomène d'atténuation du faisceau radar par les précipitations (mais bien moins que les radars bande X). En effet, les épisodes pluvieux intenses proches du radar réfléchissent ou absorbent la plupart de l'énergie du faisceau. En conséquence, seule une quantité limitée demeure disponible pour détecter les masses pluvieuses les plus distantes situées au-delà.

Ce phénomène se traduit de deux façons. La première conséquence se traduit par une atténuation générale de la mesure lorsqu'il pleut directement sur le radar, lorsque le radôme de l'antenne radar est mouillé (Andrieu, 2002). Ainsi, une baisse générale du niveau des précipitations sur toute l'image est constatée, et les mesures sont ainsi sous-estimées. Ce phénomène peut être remarquable même pour des intensités relativement modérées. Dans un second temps, en arrière des zones de précipitation les plus intenses, l'atténuation du faisceau peut être très forte, allant même dans certain cas jusqu'à l'atténuation totale (Faure, 2008). Une solution pourrait être de recourir à l'utilisation de radar de type bande L, dont les longueurs d'onde ne sont pas atténuées par les précipitations. Cependant, ces types de radar sont coûteux et ont une sensibilité moindre que les radar à bande C.

1.2.8 Précipitations sous forme de virga

Les virga sont des précipitations qui ont lieu en altitude mais qui n'atteignent pas le sol (Vigneau, 2005). Le phénomène se produit lorsque l'air est sec à basse altitude. L'humidité est alors absorbée par cet air sec avant qu'elle ne puisse toucher le sol. Le radar détecte donc en altitude des précipitations qui ne toucheront jamais le sol, provoquant ainsi dans ce cas des erreurs de mesure à prendre en compte (Faure, 2008).

1.2.9 Biais lié à la relation Z-R

La mesure de la pluie par radar peut être affectée par le choix de la relation Z-R pour convertir les réflectivités radar (Z en dBZ) en intensité de pluie (R en mm/h). Météo-France utilise la relation de Marshall et Palmer, 1948 ($Z = 200\ R^{1.6}$). Cette relation moyenne bien adaptée pour les précipitations de type stratiforme a été remise en cause pour les précipitations convectives, notamment dans les années cinquante et soixante. D'autres relations ont ainsi été proposées pour les situations convectives, comme celles de Jones (1955) ou de Sims (1964) (cf. paragraphes précédents). En outre, il peut coexister des pluies

convectives et stratiformes dans une même image, avec des distributions granulométriques de gouttes différentes. Cela signifie qu'il serait nécessaire d'appliquer différentes lois Z-R sur une même image, ce qui serait très délicat (Andrieu, 2002).

En conclusion, les limites de la mesure du radar sont nombreuses et de natures variées. La liste précédente répertorie les principales limites mais n'est pas exhaustive. Par exemple, il arrive parfois que des problèmes surviennent lorsque que le faisceau radar rencontre des migrations d'insectes ou d'oiseaux, lors du survol d'avions, à proximité de l'océan en cas de forte houle (échos de mer), ou lorsque le radar a un parc éolien dans son champ.

Avant toute utilisation quantitative d'un radar, il est donc nécessaire d'évaluer la qualité de cet outil. Dans la perspective de l'utilisation du radar local de Lyon, cette expertise va donc faire l'objet des prochains paragraphes. Elle s'appuiera sur des analyses fondées sur des simulations et sur des données réelles. Auparavant, une présentation de la localisation, des caractéristiques techniques du radar local de Lyon et des données exploitées est effectuée.

2 Des caractéristiques et des données qui dépendent de la localisation du radar

Le radar local lyonnais fait partie du réseau Aramis (Application Radar à la Météorologie Infra-Synoptique) de Météo-France (Chèze, 2002 ; Tabary et al., 2007 ; Yates et al., 2006). Ce réseau comptait 18 radars en 2002. Ce nombre a été porté à 24 en 2007, suite au programme *Panthere* (Projet Aramis Nouvelles Technologies en Hydrométéorologie Extension et Renouvellement) au sujet duquel nous reviendrons par la suite, avec trois renouvellements et six nouvelles installations (Champeaux et al., 2009 - fig. 4.2).

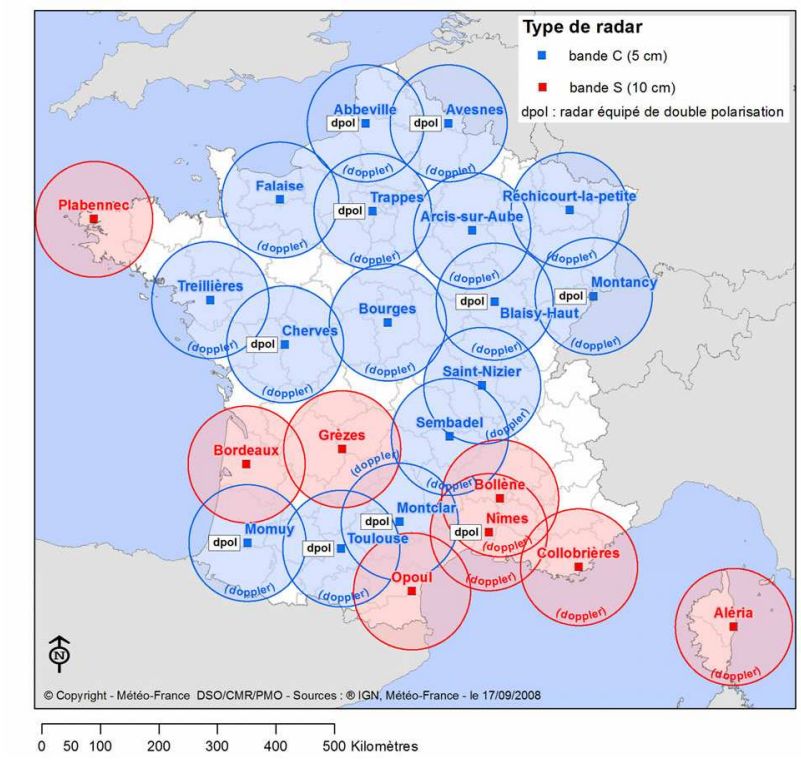


Figure 4.2 : Les radars du réseau de mesure Aramis de Météo-France en 2010 (Champeaux et al., 2009)

Désormais, de faibles zones résiduelles dont principalement l'arc alpin restent dépourvues de visibilité radar. Cette dernière région est victime de son orographie élevée qui conduit à de très nombreux échos fixes et masques. Afin de pallier cette lacune en zone montagneuse, le projet Rythmme (Risques Hydro-météorologiques en Territoires de Montagnes et Méditerranéens), se propose de déployer des radars à bande X sur ce territoire sur la période 2010-2012 (Météo-France, 2009 ; Chèze et al., 2010).

Le concept de « visibilité hydrologique » permet d'apprécier la zone de couverture d'un point de vue hydrologique. Sur 80 % de la France métropolitaine, elle se révèle satisfaisante, en particulier sur le nord du département du Rhône (Pellarin et al., 2002 – fig. 4.3).

Cependant, pour une étude plus locale à l'échelle de l'agglomération lyonnaise, il convient de mener une étude plus détaillée, fondée sur le radar local, de type bande C. La présentation de ce radar, qui a subi de nombreuses modifications de lieux et de technologies depuis sa première utilisation, fait l'objet des prochains paragraphes, avant que nous ne passions à une évaluation de sa qualité de mesure hydrologique.

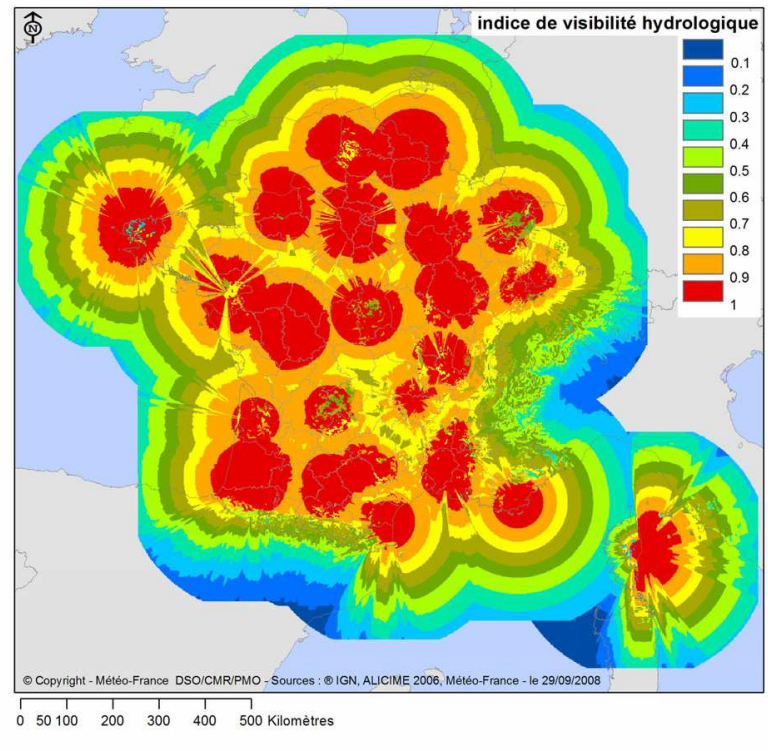


Figure 4.3 : Carte de visibilité hydrologique du réseau Aramis (Champeaux et al., 2009)

2.1 La localisation pénalisante du radar de Satolas

Le radar météorologique lyonnais a été installé au milieu des années 90' sur le site de l'aéroport Saint-Exupéry, anciennement appelé aéroport Satolas, (figures 4.4 et 4.5), à 250 mètres environ (tableau 4.2). Au début des années 2000, Météo-France a pris la décision de le placer sur un site plus favorable, à cause de difficultés de mesure sur lesquelles nous reviendrons dans les paragraphes suivants. En conséquence, ce radar a été déplacé au milieu du mois de mai 2001 sur le site de la commune de Saint-Nizier d'Azergues.

Radar	Latitude ED50 (°)	Longitude ED50 (°)	Abscisse Lambert zone II (km)	Ordonnées Lambert zone II (km)	Altitude (m)
Lyon Satolas	45,726	5,075	813,004	84,421	250

Tableau 4.2 : Coordonnées du radar de Satolas

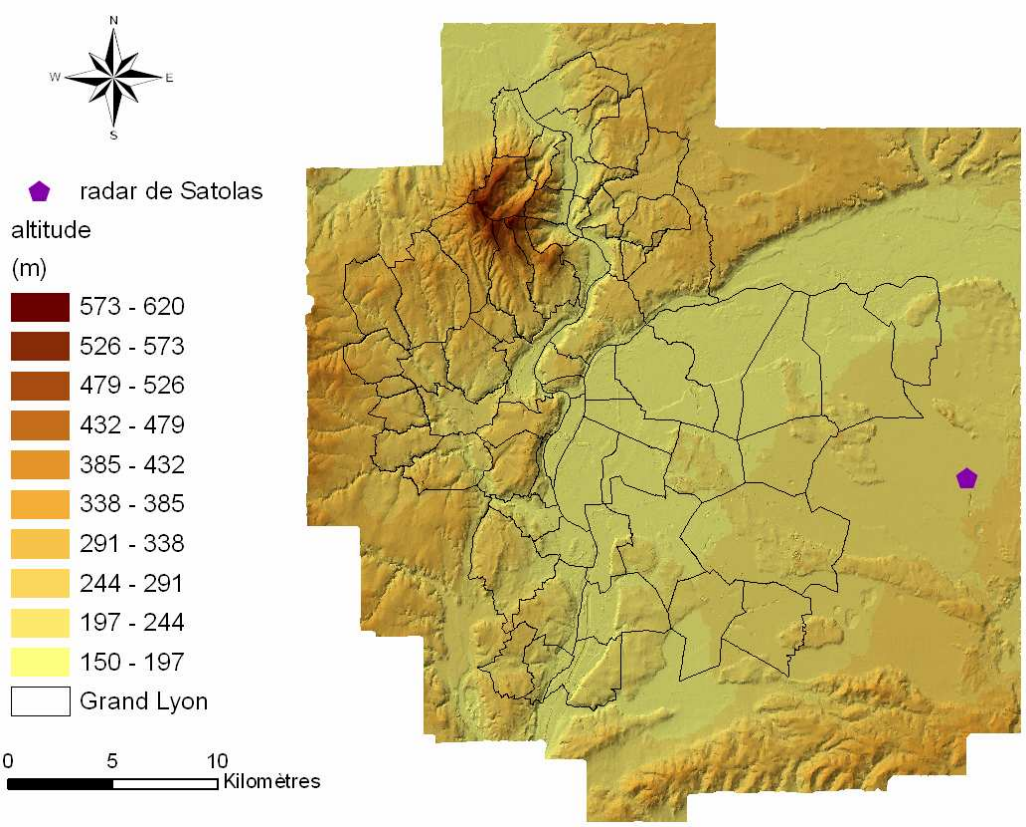


Figure 4.4 : Localisation du radar de Satolas

Figure 4.5 : à gauche, orthophoto de 1997 – le radar est bien visible (en jaune) à gauche sur le bâtiment ; à droite, orthophoto de 2003 – le radar a été déplacé sur le site de Saint-Nizier d'Azergues

Les images du radar de Satolas ont respectivement été élaborées à partir du calculateur MT750 puis du calculateur CASTOR 1, à partir de mai 1994. Les images, digitalisées sur 16 niveaux de réflectivité radar en dBZ, étaient mal étagées pour une utilisation hydrologique précise. L'angle de site était de 0,7° au dessus de l'horizontale. Les images avaient une forme carrée de 256 pixels de côté. Les pixels de forme carrée présentaient une longueur de 1,66 km. Cela fournissait ainsi une surface d'image de 424,96 km de côté (Faure, 2008 ; Météo-France, 2001).

2.2 Le radar de Saint-Nizier d'Azergues : un endroit de mesure favorable

Le radar local de Lyon a été officiellement déplacé le 14 mai 2001 du site de Satolas à celui de Saint-Nizier d'Azergues, dans les Monts du Lyonnais, à une quarantaine de kilomètres au nord-ouest de l'agglomération, et à 920 mètres d'altitude (tableau 4.3 et figures 4.6 ; 4.7 et 4.8).

Radars	Latitude ED50 (°)	Longitude ED50 (°)	Abscisse Lambert zone II (km)	Ordonnées Lambert zone II (km)	Altitude (m)
Saint Nizier	46,067	4,447	763,150	120,638	920

Tableau 4.3 : Coordonnées du radar de Saint-Nizier d'Azergues

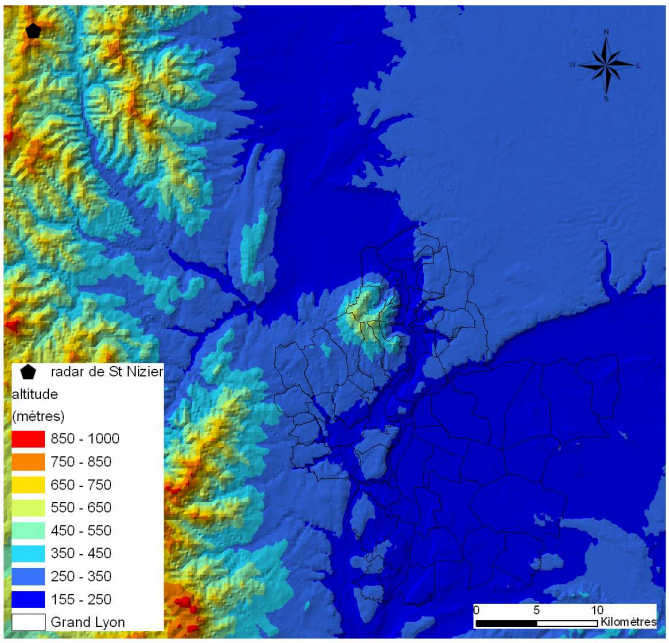


Figure 4.6 : Localisation du radar de Saint-Nizier d'Azergues

Figure 4.7 : Photographie aérienne du site du radar de Saint-Nizier d'Azergues. Le radar est désormais placé sur une crête, à 920m d'altitude (source : www.geoportail.fr)

Figure 4.8 : Photographie au sol du radar de Saint-Nizier d'Azergues, sous son radôme (cliché : Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France)

Deux types de calculateurs ont servi à constituer les données brutes du radar de Saint-Nizier. Le premier est le calculateur CASTOR 1, transféré du site de Satolas, en service jusqu'en 2003. Les mesures sont effectuées jusqu'à 256 km du radar avec un angle de site de 0,4° au dessus de l'horizontale. Elles sont doré navant digitalisées sur 54 niveaux de réflectivité radar en dBZ (et non plus seulement sur 16), avec une résolution de un dBZ (sauf pour les plus faibles valeurs). La résolution s'est également améliorée, avec des pixels d'un kilomètre carré.

Le deuxième calculateur est le CASTOR 2, mis en place à partir de 2003. Les images portent jusqu'à 280 km du radar, et sont toujours digitalisées sur les 54 niveaux de réflectivité. Les images ont toujours une taille de 512x512 km², avec une résolution spatiale de 1 km². L'angle d'élévation de l'antenne radar est unique et égal à 0,4° au dessus de l'horizontale jusqu'en 2006, date de la mise en service de la dernière génération de lames d'eau radar. Le tableau 4.4 fournit une liste de caractéristiques complémentaires du radar (Faure, 2008).

Longueur d'onde λ	Ouverture θ du faisceau à 3dB	Puissance transmise	Gain	Durée τ de l'impulsion	Bande passante à 3dB
5,33 cm	1,1°	200 kW	42 dB	2 µs	600 kHz

Tableau 4.4 : Caractéristiques techniques du radar de Saint-Nizier d'Azergues (source : fourni par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France)

2.3 La complémentarité des types de données exploitées

Météo-France fournit deux types de données pour le radar local de Lyon : des images de « réflectivité radar instantanée » et des images de « lames d'eau au sol ». Les données de réflectivité radar instantanée, dites données de « détection », ont pour vocation la prévision immédiate. Elles sont proches des mesures brutes du radar en altitude et traduisent une intensité en mm/h. Au contraire, les lames d'eau sont des estimations de cumuls au sol en mm sur des pas de temps de cinq ou quinze minutes (en fonction de la période). Les lames d'eau *Hydram* ont laissé la place mi-2006 à la génération appelée *Panthere* qui, d'après J.-L. Champeaux et al. (2009), présentent de nombreuses améliorations.

2.3.1 Les données de réflectivité : des données brutes

Les données de réflectivité correspondent à l'estimation du facteur de réflectivité radar Z (mm^6/m^3) pour chaque pixel de la couverture hydrologique du radar, à l'instant où le faisceau radar atteint ce point. L'estimation de ce facteur de réflectivité radar est sauvegardée selon une échelle logarithmique en décibels de Z (dBZ). A partir de ces valeurs de Z, il est estimé une intensité de pluie instantanée équivalente (R en mm/h). Pour cela,

nous avons vu dans les paragraphes précédents que Météo-France utilisait la relation de Marshall-Palmer 1948 : $Z = 200\ R^{1,6}$.

En ce qui concerne le radar local de Lyon, la digitalisation du facteur de réflectivité radar Z a évolué au cours du temps. Sur le site de Satolas, la digitalisation était effectuée sur 16 niveaux qui, une fois transcrits en équivalents d'intensité de pluie, se révèlent très mal étagés (tableau 4.5).

Niveau de digitalisation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
Intensité de pluie (mm/h)	0	[0 ; 0,4[	[0,4; 0,6[	[0,6; 1,1[	[1,1; 2[	[2 ; 3,7[	[3,7 ; 6,5[	[6,5 ; 12[	[12; 21[	[21 ; 36[	[36 ; 65[	[65 ; 115[	[115 ; 205[	[205 ; 365[	[365; 650[	> 650

Tableau 4.5 : Correspondance entre niveau de digitalisation radar et intensité de pluie, d'après la relation de Marshall-Palmer, 1948 (Faure, 2008)

Cependant, avec le déplacement de ce radar à Saint-Nizier-d'Azergues, la digitalisation est effectuée sur 54 niveaux. Une fois ces niveaux retranscrits en équivalents d'intensité de pluie, il est possible d'obtenir une évolution assez précise des intensités de pluie. Par exemple, pour $Z = 200\ R^{1,6}$ (Marshall-Palmer, 1948), chaque élévation de réflectivité de $\Delta = +1$ Dbz correspond à une augmentation relative de l'intensité pluvieuse d'un facteur multiplicatif F égal à 1,155 (tableau 4.6). Un rapide comparatif des tableaux 4.5 et 4.6 montre l'amélioration de la précision de l'appréciation des intensités pluvieuses.

L'intérêt des données de réflectivité radar instantanée est multiple. En effet, ces images traduisent directement les phénomènes pluvieux et leur intensité en mm/h au point de mesure en altitude. Ensuite, les données ne sont pas affectées par les imperfections des traitements qui permettent d'estimer les lames d'eau *Hydram* au sol, et dans une moindre mesure les lames d'eau *Panthere*. Enfin, jusqu'à mi-2006, date du changement des lames d'eau au sol *Hydram* à *Panthere*, ces lames d'eau n'étaient accessibles qu'au pas de temps de 15 minutes, à la différence des données de réflectivité (5 minutes). Cette fréquence élevée permet ainsi de suivre de manière beaucoup plus détaillée la dynamique des phénomènes ; une fréquence de 15 minutes se révèle souvent insuffisante pour l'étude locale d'épisodes pluvieux possédant une forte advection.

Niveau de digitalisation (sans dimension)	**Intensité de pluie** (mm/h)		**Niveau de digitalisation** (sans dimension)	**Intensité de pluie** (mm/h)
0	inf. à 0,2 mm/h		27	20,5<=I<23,7
1	0,2<=I<0,4		28	23,7<=I<27,3
2	0,4<=I<0,6		29	27,3<=I<31,6
3	0,6<=I<0,7		30	31,6<=I<36,5
4	0,7<=I<0,9		31	36,5<=I<42,1
5	0,9<=I<1,0		32	42,1<=I<48,6
6	1,0<=I<1,2		33	48,6<=I<56,2
7	1,2<=I<1,3		34	56,2<=I<64,8
8	1,3<=I<1,5		35	64,8<=I<74,9
9	1,5<=I<1,8		36	74,9<=I<86,5
10	1,8<=I<2,1		37	86,5<=I<99,9
11	2,1<=I<2,4		38	99,9<=I<115,3
12	2,4<=I<2,7		39	115,3<=I<133,2
13	2,7<=I<3,2		40	133,2<=I<153,8
14	3,2<=I<3,6		41	153,8<=I<177,6
15	3,6<=I<4,2		42	177,6<=I<205,0
16	4,2<=I<4,9		43	205,0<=I<236,8
17	4,9<=I<5,6		44	236,8<=I<273,4
18	5,6<=I<6,5		45	273,4<=I<315,8
19	6,5<=I<7,5		46	315,8<=I<364,6
20	7,5<=I<8,6		47	364,6<=I<421,1
21	8,6<=I<10,0		48	421,1<=I<486,2
22	10<=I<11,5		49	486,2<=I<561,5
23	11,5<=I<13,3		50	561,5<=I<648,4
24	13,3<=I<15,4		51	648,4<=I<748,8
25	15,4<=I<17,8		52	748,8<=I<864,7
26	17,8<=I<20,5		53	0,2<=I<0,30
			255	Pas de mesure

Tableau 4.6 : Correspondance entre niveau de digitalisation radar et intensité de pluie (source : fourni par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France)

2.3.2 Les lames d'eau : des données corrigées

Les données de lames d'eau sont estimées par Météo-France à partir du facteur de réflectivité radar Z, et ne sont disponibles que depuis le déplacement du radar à Saint-Nizier d'Azergues en 2001. La qualité de l'estimation des lames d'eau a grandement évolué au cours du temps. De grandes améliorations ont notamment vu le jour, mi 2006, lors du passage de la génération *Hydram* à *Panthere*.

- *Lames d'eau Hydram*

Pour le radar de St-Nizier de 2001 à mi 2006, le calcul des lames d'eau *Hydram* est réalisé à l'aide des mesures de Z effectuées pour un seul angle de site de 0,4°. La relation Z-R de Marshall-Palmer, 1948 est utilisé pour calculer le cumul pluvieux, et les lames d'eau sont sauvegardées toutes les quinze minutes. En outre, une advection est appliquée aux images de manière à tenir compte du déplacement des zones de pluie entre deux pas de temps (fig. 4.9 a et 4.9 b).

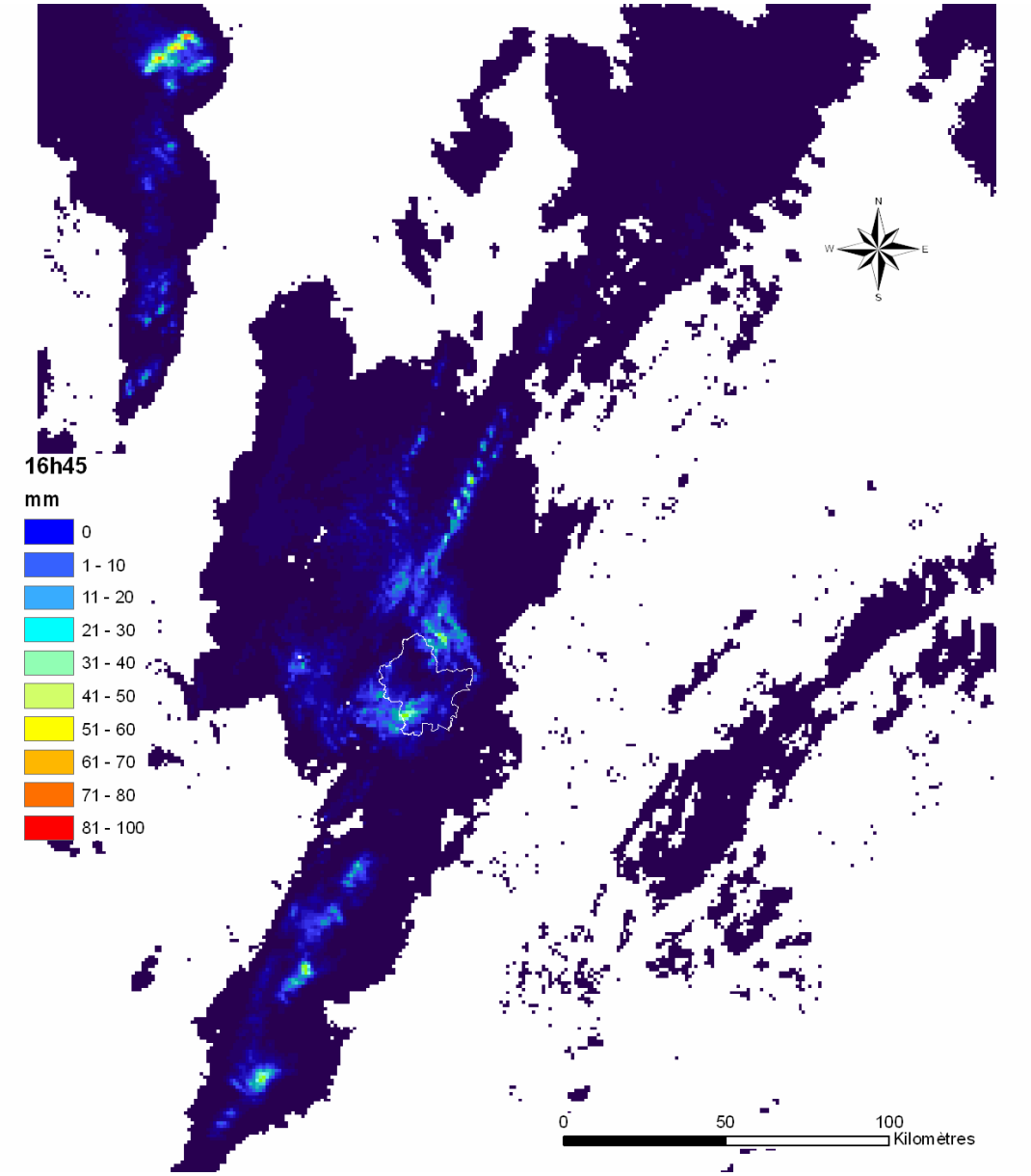


Figure 4.9 a : Cumul pluviométrique de l'événement du 29 juillet 2005 de 16h30 à 16h45. Carte issue du cumul de trois images de réflectivité, à comparer avec la figure 4.9 b, correspondant à la lame d'eau au sol pour la même période.

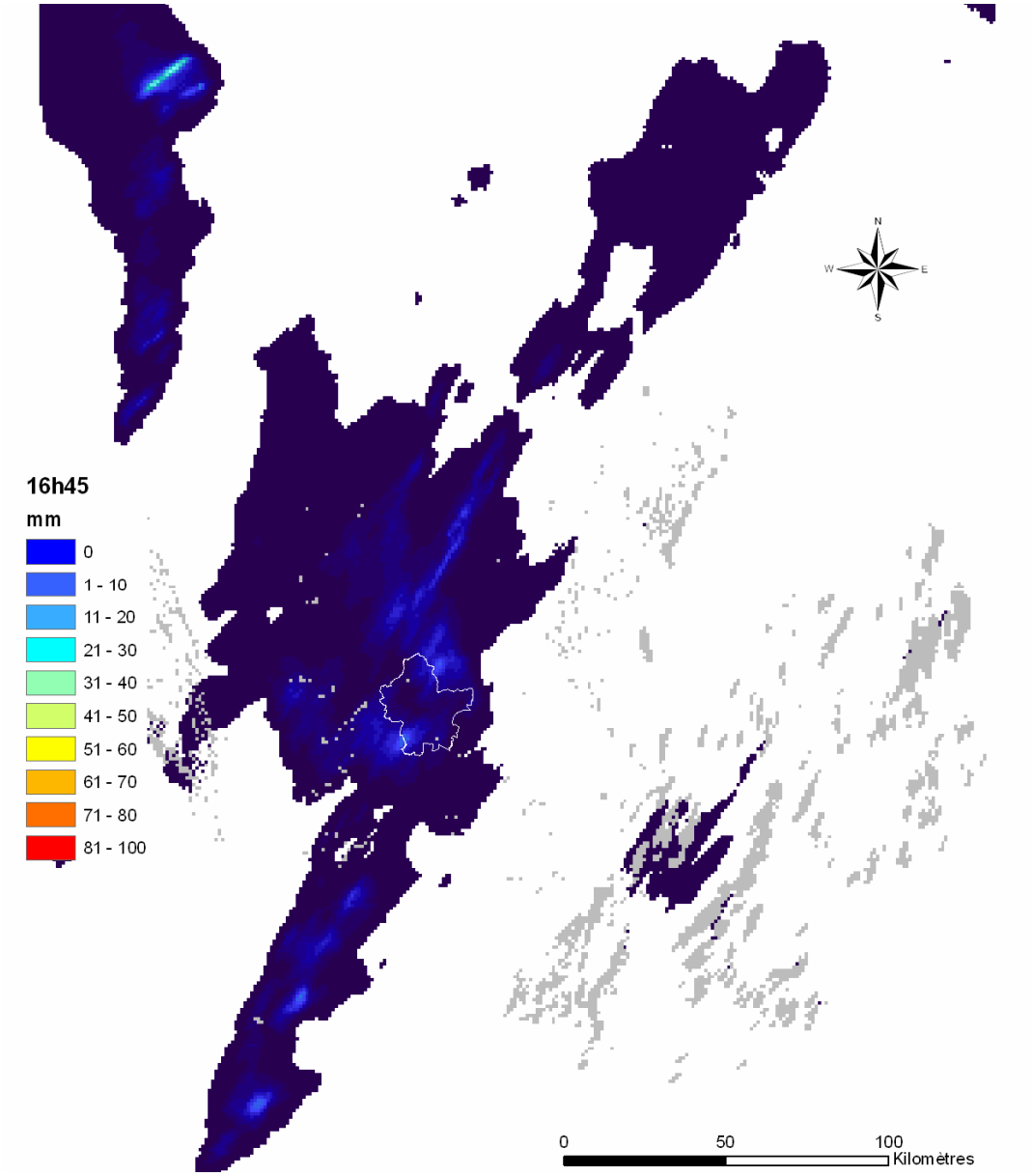


Figure 4.9b : Cumul pluviométrique de l'événement du 29 juillet 2005 de 16h30 à 16h45. Carte correspondant à la lame d'eau au sol ce cette période (à comparer à la figure 4.9 a). L'advection sur l'image de la lame d'eau est nettement visible (fig. 4.9 b), le cumul apparaît clairement plus lissé et moins saccadé que celui des données de réflectivité (fig. 4.9 a). Cela est particulièrement perceptible lorsque l'on examine le noyau de pluie de forte intensité au nord-ouest de l'agglomération.

Un facteur de remise à niveau globale (facteur correctif Ke), établi par le service DSO/CMR/PMO de Météo-France, est appliqué aux lames d'eau afin de corriger un biais éventuel de la mesure radar. Ce facteur correctif apporte une correction spatialement uniforme dans l'espace. Ce biais est attribué à de multiples facteurs parmi lesquels un

mauvais étalonnage du radar ou encore un décalage dans le profil vertical de réflectivité utilisé. Pour les lames d'eau *Hydram*, les valeurs de ce facteur correctif Ke évoluent dans le temps à un rythme mensuel (mais pouvaient occasionnellement varier plus rapidement lorsque des informations fiables le justifiaient). L'effet de ce coefficient correcteur est nettement visible sur la figure précédente, lors de l'épisode du 29 juillet 2005. À cette date, le coefficient Ke fourni est de 0,6, ce qui explique les écarts de cumuls entre les données de réflectivité et les donnés de lame d'eau (pour lesquelles ce coefficient a été appliqué).

Il est établi en comparant chaque mois les lames d'eau radar avec les données interpolées des réseaux pluviométriques de Météo-France. Pour un territoire donné, la qualité du facteur correctif augmente avec le nombre de points de mesure utilisés pour son calcul. Cependant, il est nécessaire que la valeur mensuelle du facteur correctif soit disponible rapidement. En conséquence, deux facteurs correctifs sont définis à des dates différentes, et reposent sur les données des réseaux de mesure disponibles lors de leur calcul.

En complément du facteur correctif Ke, il existe ainsi deux facteurs correctifs complémentaires : le facteur correctif réduit Kr et le facteur correctif complet Kc. Le facteur correctif réduit Kr est établi à partir du réseau pluviométrique réduit, c'est-à-dire à partir des postes automatiques en temps réel (station du type 2 du réseau de Météo-France). Il est disponible en général en début de mois. Le facteur correctif réduit Kr dispose d'une information sur sa qualité qui indique notamment s'il a pu être calculé ou non, en particulier en cas de cumul de pluie trop faible.

Le facteur correctif Kc est établi à partir du réseau de mesure au sol complet, qui comprend ainsi les stations automatiques en temps réel (type 2), en temps différé (type 3), les stations professionnelles avec observation humaine (type 0), les stations non professionnelles avec observation humaine (type 1), les stations bénévoles manuelles (type 4) et enfin les stations automatiques ou les postes à interrogation occasionnelle (type 5). Il n'est disponible au plus tôt que les 45 jours après la fin du mois. Lorsqu'il est disponible, il est conseillé d'utiliser ce coefficient pour les études en temps différé. Le tableau 4.7, transmis spécialement par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France, donne la liste de ces coefficients pour les journées de la période 2001-2005 qui serviront de base aux prochaines études. En conséquence, les coefficients de correction réduits ou complets seront utilisés systématiquement par la suite pour les dates où ils sont disponibles.

Date	Ke	Kr	Kc
20010714	0.7	0.7	0.7
20010715	0.7		
20010922	0.8	0.8	0.8
20010923	0.8		
20020501	0.6	0.7	0.7
20020502	0.6		
20020716	0.9	1	1
20020909	1.0	1.1	
20020919	1.0		
20021016	1.1	1	1
20021017	1.1		
20021123	1.0	1.1	0.9
20021124	1.0		
20031201	0.69	0.7	0.6
20031202	0.69		
20031203	0.69		
20031204	0.69		
20031205	0.69		
20031206	0.69		
20031207	0.69		
20031208	0.69		
20040313	0.69	0.7	0.5
20040723	0.69	0.6	0.4
20040804	0.69	0.8	0.9
20040817	0.6		
20041025	0.8	0.8	0.5
20041026	0.8		
20050407	0.69	0.7	0.8
20050408	0.69		
20050414	0.69		
20050415	0.69		
20050416	0.69		
20050417	0.69		
20050418	0.69		
20050419	0.69		
20050420	0.69		
20050421	0.69		
20050422	0.69		
20050423	0.69		
20050424	0.69		
20050729	0.6	0.6	

Tableau 4.7 : Facteurs correctifs de lames d'eau (fournis par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France, 2008). Ke = facteur correctif : coefficient effectivement appliqué aux données de lames d'eau archivées ; Kr et Kc = coefficient correctif réduit et complet : valeurs finales des facteurs recommandés par Météo-France pour une utilisation en temps différé, selon le type de réseau pluviométrique utilisé (réduit (Kr) puis complet (Kc))

À la différence des données de réflectivité qui sont des produits de détection des masses pluvieuses, les images de lames d'eau au sol sont utiles pour l'estimation de cumuls sur un territoire donné. De ce fait, ces images sont exprimées directement en mm de pluie au sol. Elles prennent en compte le déplacement des zones pluvieuses pour représenter la «trace au sol» des phénomènes pluvieux, et non une observation instantanée comme les données de réflectivité.

En outre, les zones affectées d'échos fixes sont filtrées et remplacées par un code de valeur indisponible (-1). Cette correction est clairement visible sur la figure précédente où un grand nombre de pixels erronés sur le cumul de réflectivité a été rectifié (en gris clair) sur le cumuls de lame d'eau au sol. Les zones en question correspondent aux massifs montagneux du Massif Central, des Alpes et du Jura. Cependant, cette correction d'échos fixes ne va pas sans poser de problèmes, et sera abordée en détail lors de l'étude de la qualité de mesure hydrologique des lames d'eau *Hydram*. Consciente de ce problème majeur, Météo-France a décidé de réagir et de proposer depuis le milieu de l'année 2006 une nouvelle génération de lames d'eau. Cette dernière génération, les lames d'eau *Panthere*, sont développées afin de remédier notamment à ces problèmes d'échos fixes.

- *Lames d'eau Panthere*

En réaction aux limites liées aux lames d'eau de génération *Hydram* précédemment exposées, Météo-France a lancé en 2006 le projet *Panthere*. Des améliorations technologiques telles que la technique doppler qui permet une mesure plus fine des précipitations, la double polarisation avec une émission d'ondes verticales en complémement des ondes horizontales, et l'utilisation de plusieurs angles de sites ont été extrêmement bénéfiques à la mesure radar. Cette dernière amélioration a été cruciale pour le radar de Saint-Nizier. Nous avons vu que les lames d'eau *Hydram* ne bénéficiaient que d'un seul angle de site de 0,4°. Or, la technologie *Panthere* permet l'exploitation de plusieurs angles d'élévation. Cette avancée trouve sa justification dans la nécessité d'élever le faisceau radar, quand cela est nécessaire, au-dessus des obstacles orographiques, et de s'affranchir ainsi des problèmes liés aux échos fixes et aux masques. D'une manière concrète, le radar de Saint-Nizier utilise désormais trois angles d'élévation : 0,4° ; 1° et 1,6° (fig. 4.12). Ainsi, « la valeur de quantité de précipitations est déduite d'une combinaison linéaire pondérée des différentes mesures aux angles d'élévation disponibles » (Champeaux et al., 2009).

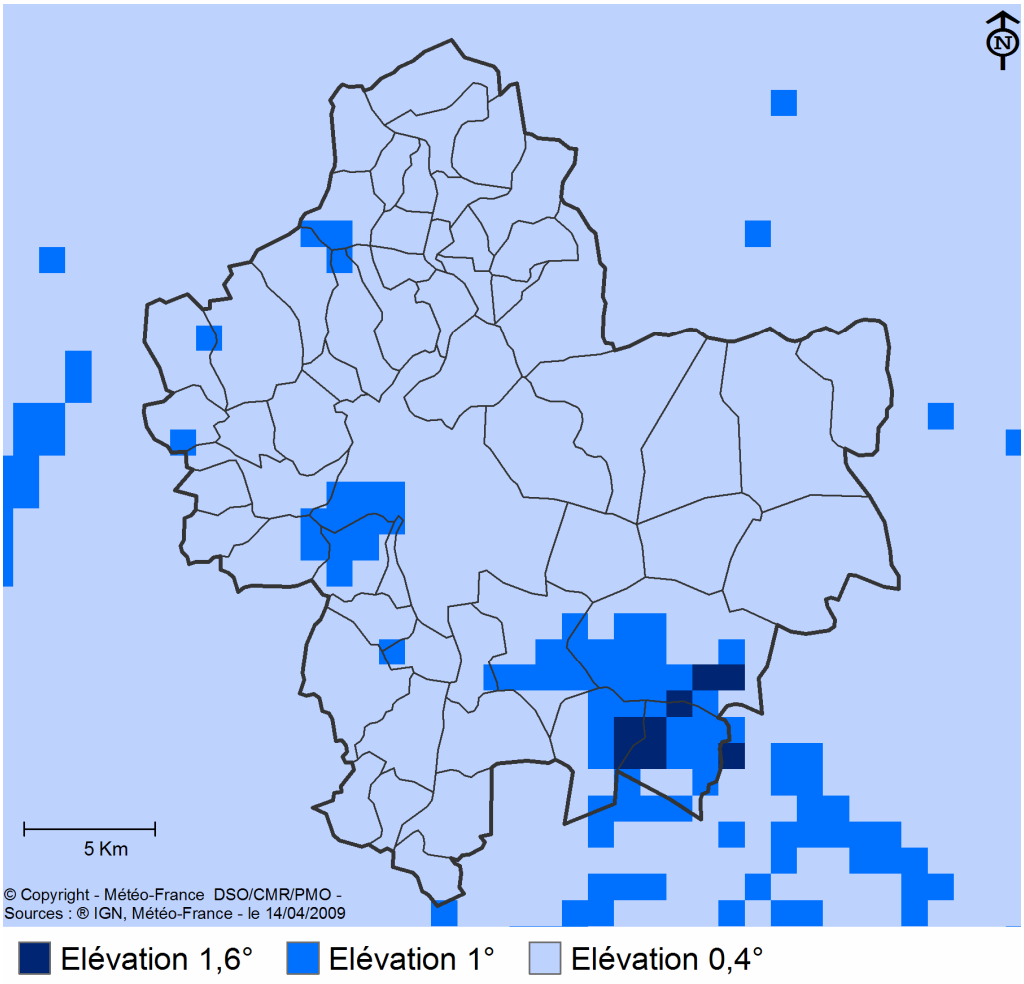


Figure 4.10 : Angles d'élévation du radar de Saint-Nizier sur le Grand Lyon (source : fourni par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France)

Les améliorations technologiques de la génération de lames d'eau *Panthere* sont donc la correction des masques orographiques ou anthropiques, l'élimination des échos fixes, les sous-estimations liées à l'élévation du faisceau radar, la correction des bandes brillantes ou encore l'ajustement de la loi Z-R. Enfin, il est dorénavant effectué un ajustement en temps réel des lames d'eau radar par le réseau de pluviomètres de Météo-France. En effet, il est quelquefois constaté des différences importantes entre les lames d'eau estimées par le radar et celles mesurées par le réseau au sol. Cela peut être lié à une dérive électronique, ou à une raison physique telle que la variation de la loi Z-R. Pour remédier à cela, et depuis le 29 mars 2007, un ajustement horaire des lames d'eau est appliqué à l'aide des données pluviométriques de la couverture hydrologique du radar (Champeaux *et al.*, 2009).

Le radar local de Lyon a donc connu des modifications de sites et des améliorations technologiques profondes depuis sa mise en service. Ces mesures de pluie sont d'une

importance cruciale pour la connaissance de l'aléa pluvial sur le Grand Lyon, et plus particulièrement pour les simulations hydrologiques du système d'assainissement lyonnais (Michaelides et al., 2009). Il est donc nécessaire de connaître de manière précise la fiabilité et la qualité de ces données, à chacune des époques et pour chaque génération de lames d'eau. Cette évaluation de la qualité hydrologique des données radar va donc faire l'objet des prochains paragraphes, en distinguant les périodes où le radar était installé à Satolas puis celles où il était installé à Saint-Nizier, et en différenciant les lames d'eau au sol *Hydram* des lames d'eau *Panthere*. Cette étude chronologique permettra de mettre en exergue les améliorations profondes apportées par Météo-France concernant la qualité de mesure hydrologique du radar local lyonnais.

3 Une qualité de mesure du radar en nette amélioration

3.1 La faible qualité de mesure du radar de Satolas

Le radar météorologique de Météo-France était installé sur le site de l'aéroport Satolas jusqu'à début 2001. L'évaluation de sa qualité de mesure hydrologique pour cette époque s'appuie essentiellement sur des sources bibliographiques provenant de Météo-France, et l'étude concrète d'un épisode pluvieux, celui du 29 septembre 1993 (troisième épisode le plus remarquable en termes de hauteur totale d'eau cumulée de la période 1988-2005).

3.1.1 Le retour d'expérience de Météo-France

Une analyse de la qualité de mesure du radar de Satolas a été publiée par Météo-France en 2001 (Météo-France, 2001). Cette étude revient notamment sur les raisons qui ont conduit à la délocalisation du radar vers Saint-Nizier.

Météo-France a réalisé une cartographie des échos fixes et des masques observés sur les images radar (fig. 4.11). Nous constatons que les alentours proches du radar, c'est-à-dire

précisément Lyon et ses environs, sont très fortement affectés par des échos fixes permanents ou intermittents. En outre, des masques forts liés à l'orographie sont à déplorer. Il existe même un masque d'une très grande intensité à proximité du radar, à 60°N environ. Ce masque d'origine anthropique est provoqué par l'obstruction du faisceau radar par la gare ferroviaire de l'aéroport Saint-Exupéry. Cette gare, inaugurée en 1994, est située à 666 mètres du radar. Le problème vient du fait que son toit culmine à 39 mètres, créant un masque très important et entraînant une perte de visibilité considérable (fig. 4.12 et 4.13).

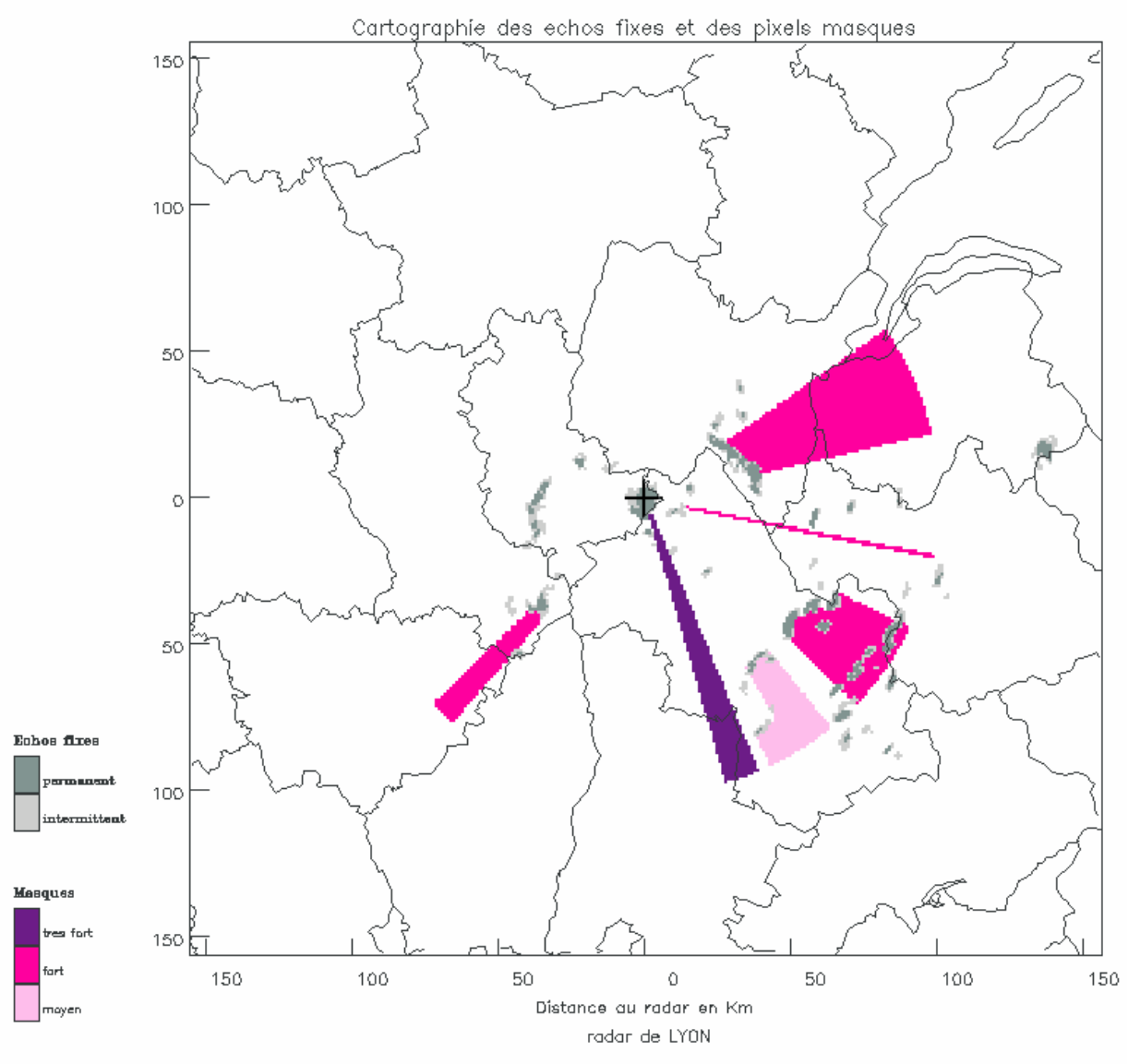


Figure 4.11 : Analyse Météo-France des échos fixes et des masques du radar de Lyon Satolas (source : Météo-France, 2001)

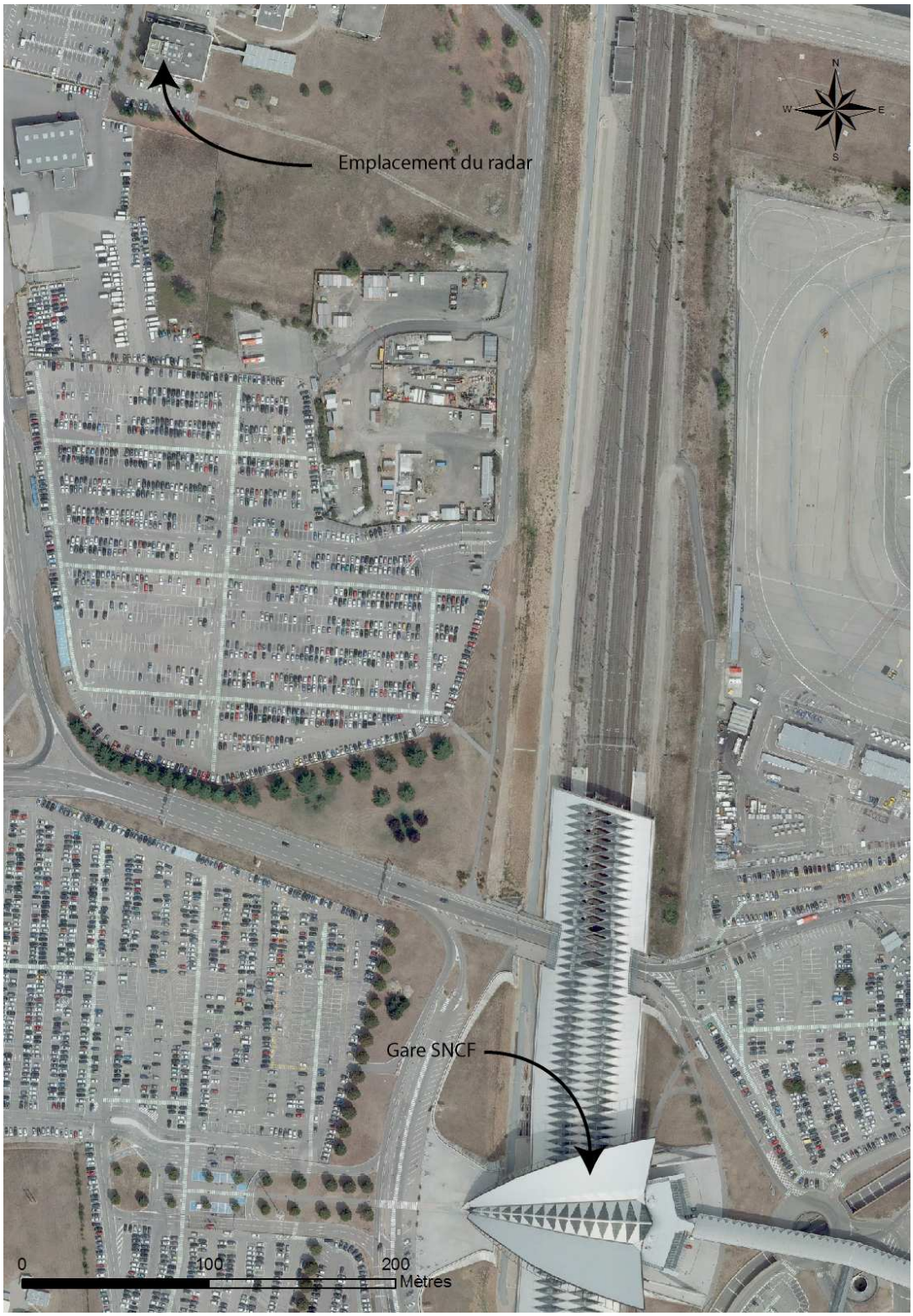


Figure 4.12 : Orthophoto du site du radar et de la gare SNCF

Figure 4.13 : Photographie de la gare SNCF de 39 mètres de haut (cliché : F. Renard)

Le cumul des lames d'eau radar de l'ensemble du mois de mars 2001 (fig. 4.14) montre des résultats fortement dégradés en comparaison de l'interpolation des mesures pluviométriques au sol de la même période (fig. 4.15). Les mesures pluviométriques au sol de Météo-France indiquent un cumul à Lyon pour le mois de mars de 125 à 150 mm (en accord avec les mesures du réseau du Grand Lyon). Or, selon le radar, le cumul sur Lyon et ses environs n'excéderait pas 50 mm, puis augmenterait progressivement jusqu'à une distance de 100 km environ. On peut, en outre, remarquer des valeurs très fortement surestimées correspondant à des zones d'échos fixes où le cumul mensuel atteindrait 500 mm.

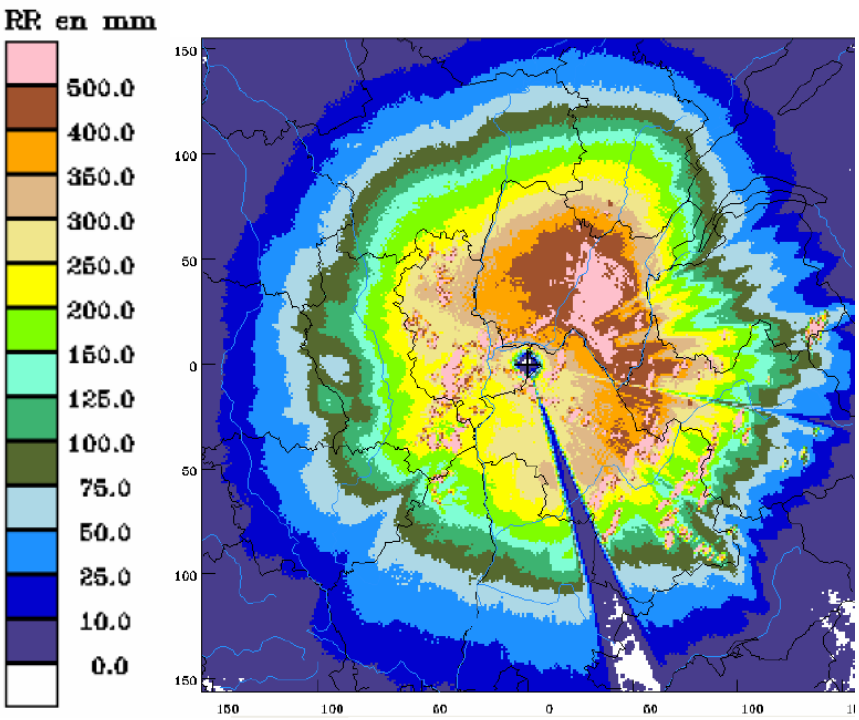


Figure 4.14 : Cumul des lames d'eau radar de mars 2001. La croix matérialise l'emplacement du radar de Satolas (source : Météo-France, 2001)

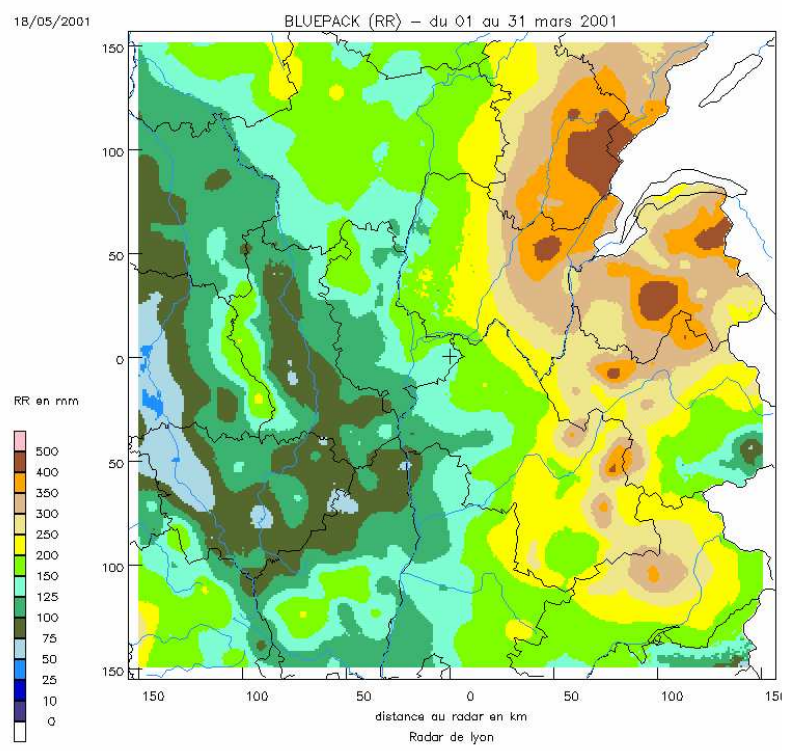


Figure 4.15 : Interpolation des mesures pluviométriques du réseau de Météo-France de mars 2001. La croix matérialise l'emplacement du radar de Satolas (source : Météo-France, 2001)

3.1.2 Etude de la journée du 22 septembre 1993

Les valeurs de réflectivité radar de la journée du 22 septembre 1993 ont été converties en équivalent d'intensité de pluie à l'aide de la relation Marshall-Palmer, 1948, et le cumul en a été extrait (fig. 4.16 et 4.17). Sur le cumul de la journée à large échelle (fig. 4.16), nous remarquons les mêmes zones affectées par des problèmes d'échos fixes que sur la carte d'analyse de Météo-France des échos et des masques du radar de Lyon Satolas (fig. 4.11).

À l'échelle spatiale de l'agglomération lyonnaise, ce cumul radar est comparé à celui issu des valeurs du réseau pluviométrique au sol du Grand Lyon (fig. 4.18). Nous constatons un manque de cohérence entre les deux procédés. En effet, les dissemblances sont fortes, aussi bien sur la quantité de pluie tombée que sur sa distribution spatiale.

D'un point de vue quantitatif, le radar indique sur la grande majorité du Grand Lyon une hauteur d'eau comprise entre un et six millimètres. Cependant, une vingtaine de pixels du cœur de l'agglomération présentent des valeurs de cumuls bien plus fortes, atteignant 54 mm par endroit (1er et 9ème arrondissements). Ces hauteurs d'eau ne correspondent pas du tout avec l'interpolation des mesures du réseau au sol (fig. 4.18). Ces dernières indiquent un cumul moyen de 90 mm. Outre l'inadéquation du côté quantitatif, les dissimilitudes ressortent aussi sur le plan de la distribution spatiale de l'événement. Alors que les pluviomètres nous renseignent sur un épisode plutôt homogène avec une faible variabilité spatiale (conformément aux observations des chapitres précédents pour ce type de pluie), le radar nous indique une très forte variabilité, avec de brusques discontinuités, notamment au centre de l'agglomération. En effet, à cet endroit, en l'espace d'un kilomètre, les valeurs pluviométriques sont multipliées par un facteur de dix.

Ce manque de précision et de fiabilité, d'un point de vue aussi bien quantitatif que de distribution des champs de pluie, ajouté aux problèmes d'échos fixes et de masques, a conduit Météo-France à déplacer ce radar début 2001 sur une localisation plus pertinente. En effet, situé à 250 mètres d'altitude avec un angle d'élévation de 0,7°, le radar était beaucoup trop bas pour mesurer la pluie correctement, en particulier sur l'agglomération lyonnaise. La construction en 1994 de la gare ferroviaire d'une hauteur considérable à proximité du radar a aggravé la situation en créant un masque non négligeable. Le radar a donc été déplacé à Saint-Nizier d'Azergues, à une quarantaine de kilomètres au nord-ouest de l'agglomération, à une hauteur de 920 mètres. L'étude de la qualité des données issues du radar à cette localisation est l'objet des paragraphes suivants.

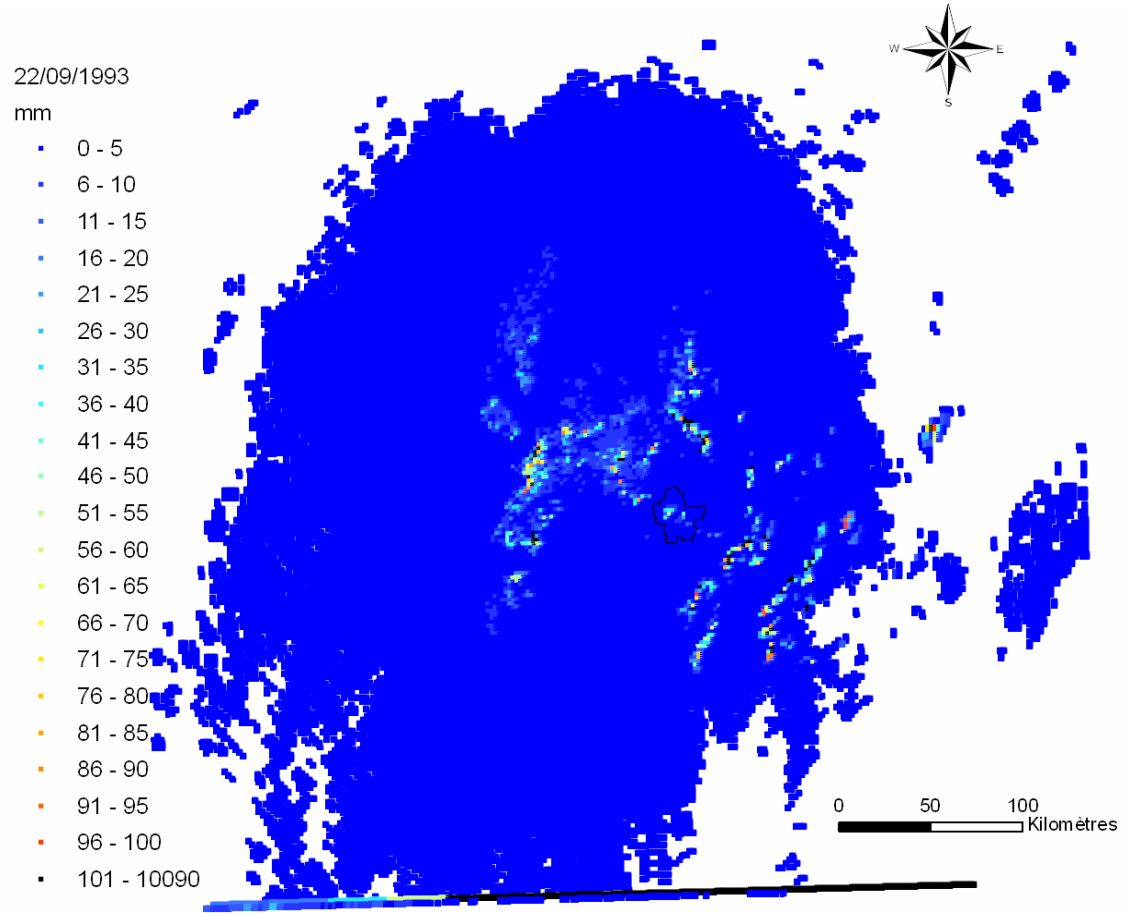


Figure 4.16 : Cumul radar de la journée du 22 septembre 1993 sur l'ensemble de sa zone de couverture

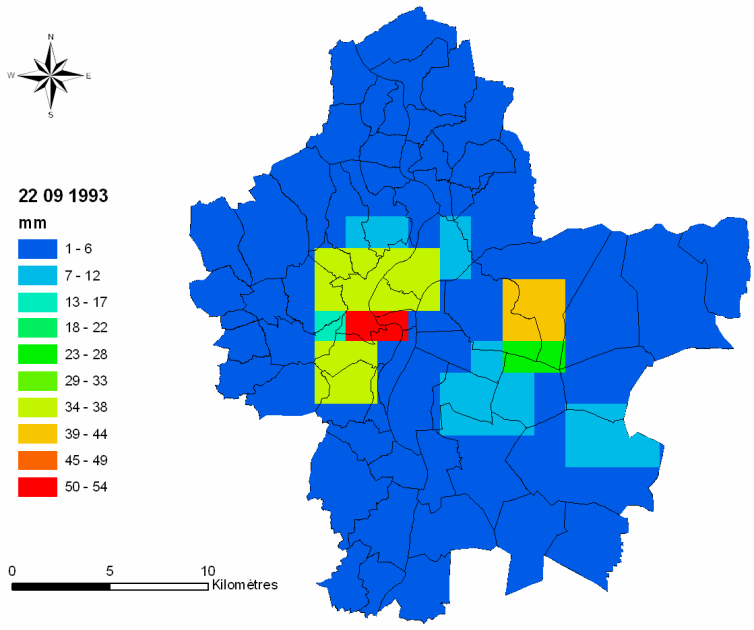


Figure 4.17 : Cumul radar de la journée du 22 septembre 1993 sur le Grand Lyon

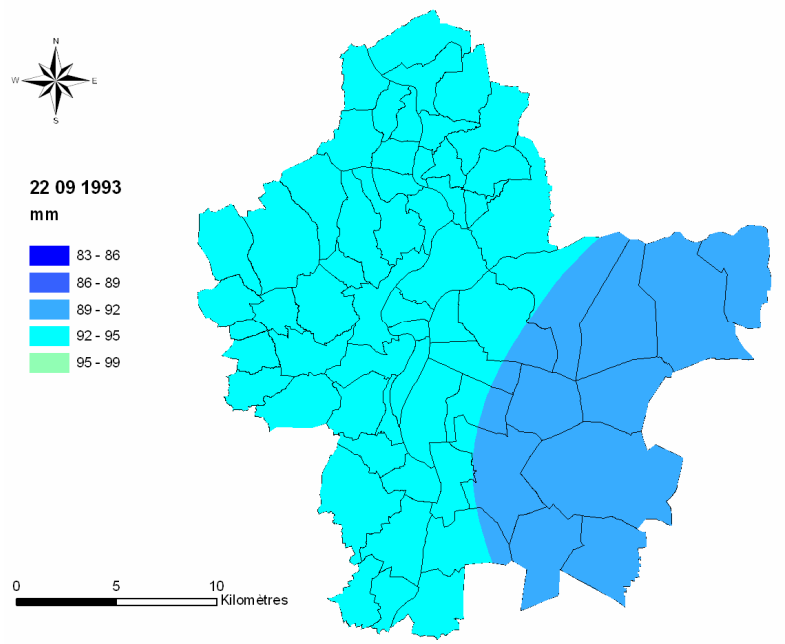


Figure 4.18 : Cumul de la journée du 22 septembre 1993 sur le Grand Lyon à partir du réseau pluviométrique au sol

3.2 Une qualité de mesure qui bénéficie de la délocalisation à Saint-Nizier (période 2001 – 2006)

Le radar est officiellement entré en activité à Saint-Nizier le 14 mai 2001. De cette date à mi 2006, les lames d'eau produites étaient de la génération *Hydram*, qui ont ensuite cédé la place aux lames d'eau *Panthere*. L'évaluation de leur qualité fait chronologiquement l'objet des paragraphes suivants.

Nous avons vu précédemment que les lames d'eau *Hydram* souffraient d'une utilisation capricieuse de l'effaceur d'échos fixes (EEF). En effet, les échos fixes sont un problème majeur de l'hydrologie quantitative par radar, et leur localisation précise est nécessaire afin de les filtrer dans les études ultérieures. Leur localisation est donc effectuée, en réalisant dans un premier temps une analyse par simulation, qui sera confortée dans un second temps par une analyse fondée sur des données réelles.

3.2.1 Analyse par simulation : mode opératoire

Cette étude par simulation de la qualité de mesure hydrologique du radar de Saint-Nizier de la période 2001-2006 a été réalisée en collaboration avec Dominique Faure du bureau d'études *Alicime*, spécialisé dans la prestation de services scientifiques concernant l'exploitation des données des radars météorologiques.

L'approche de simulation mise en application ici reprend le protocole élaboré par Delrieu et al. (1995), Pellarin (2001), Pellarin et al. (2002) et Faure (2005). Nous ne rappellerons donc ici que les points principaux. Deux étapes successives sont à la base des simulations. La première correspond à la simulation des échos fixes et des masques générés par le relief. La seconde étape porte sur l'intégration des effets de la structure verticale des précipitations sur les erreurs théoriques commises lors de l'estimation des intensités de pluie au sol. Cette erreur théorique sera exprimée sous la forme du rapport R*/R entre la mesure erronée des intensités de pluie (R* en mm/h) et la mesure correcte de ces intensités (R en mm/h).

3.2.1.1 1ère étape : simulation des interactions onde – relief

La première étape est une simulation numérique des interactions des ondes électromagnétiques du radar qui entrent en interaction avec le relief présent dans la zone de couverture du radar météorologique. Le relief de la zone est issu du modèle numérique de terrain de la BD Alti ® de l'IGN. Ce MNT dispose d'une résolution de 250 m. Cette résolution a été choisie car il s'agit de la meilleure résolution librement mise à disposition par l'IGN, et est correcte pour la précision souhaitée de notre étude. Un trop grand nombre de points côtés au sol auraient eu pour effet de ralentir cette étude en rallongeant de manière considérable les temps de computation.

Le calcul est réalisé en tenant compte des caractéristiques géométriques du faisceau radar, d'une propagation standard du faisceau dans l'atmosphère, et de la répartition d'énergie au sein de ce faisceau. Il utilise trois sources de données principales :

- *Les paramètres du radar : ils permettent de décrire de manière précise le volume de résolution du faisceau principal. Ces caractéristiques tiennent compte de l'ouverture du faisceau principal en fonction de la distance au radar, de la répartition de puissance au sein du faisceau modélisée par une fonction de pondération angulaire, et se sert également d'une fonction de pondération radiale adaptable à la longueur d'onde et à la bande passante du récepteur du radar (tableau 4.4 et figure 4.19).*

- *Un modèle électromagnétique : il permet de décrire les caractéristiques moyennes de rétrodiffusion du sol en fonction de l'angle d'incidence des ondes radar et de la longueur d'onde du radar.*
- *Le modèle numérique de terrain (fig. 4.20) utilisé pour caractériser la géométrie des interactions ondes – relief (surface illuminée, angle d'incidence).*

La simulation permet ainsi d'estimer l'intensité des échos de sol et la partie du faisceau masquée par les reliefs (Faure, 2008).

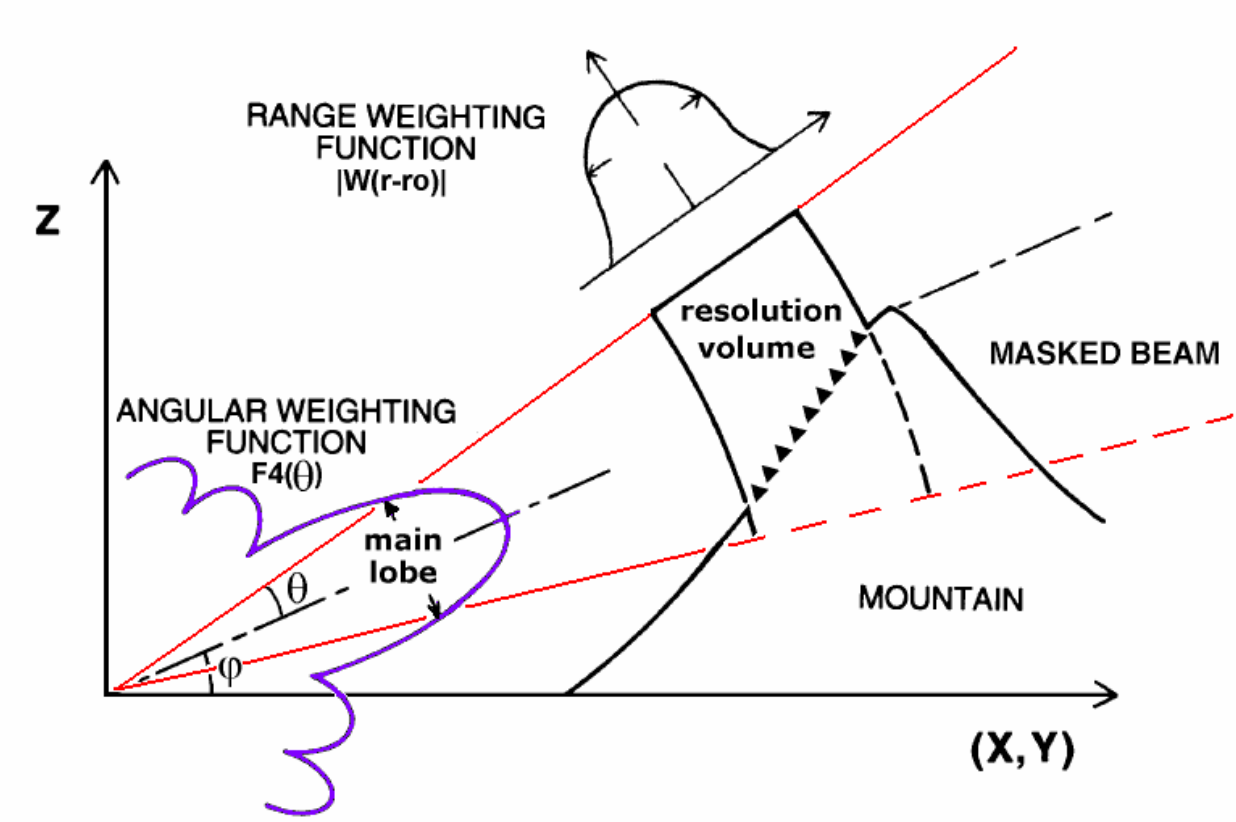


*Figure 4.19 : Description des interactions ondes-relief (adapté de Delrieu et al. 1995). La surface matérialisée par les triangles noirs est déterminée par une intégration numérique détaillée sur chaque volume de résolution. Pour cela, une fonction de pondération angulaire et une fonction de pondération radiale sont utilisés (*angular weighting function *and* range weighting function*).*

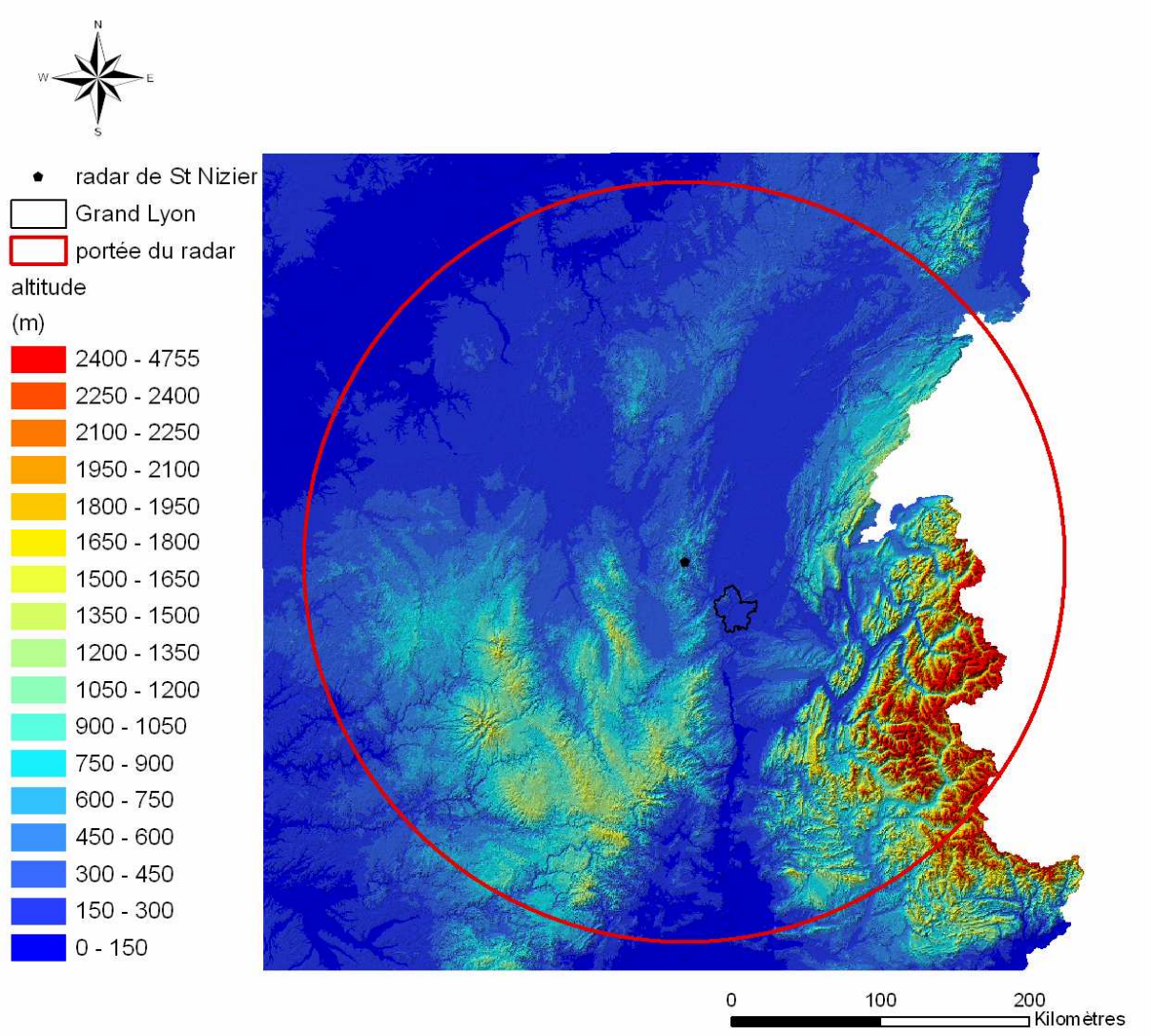


Figure 4.20 : Relief présent dans la zone de couverture du radar météorologique de Saint-Nizier (issu de la BD Alti ® de l'IGN, résolution de 250 m)

3.2.1.2 2ème étape : prise en compte de l'effet du PVR

La seconde étape est une procédure de simulation qui détermine pour chaque volume de résolution l'erreur qui affecte l'estimation de pluie au sol. Cette procédure est réalisée en intégrant les résultats de la première étape de la simulation des interactions et les effets des variations verticales de la réflectivité radar. Le PVR choisi est celui utilisé par Météo-France. Il est de type convectif : constant de 0 m à 1100 m d'altitude, puis décroissant de -1.5dBZ par kilomètre (fig. 4.21). La projection des volumes de résolution sur une grille cartésienne permet d'estimer des cartes d'erreur qui affectent les estimations de pluie au sol en tout point de la zone couverte par le radar.

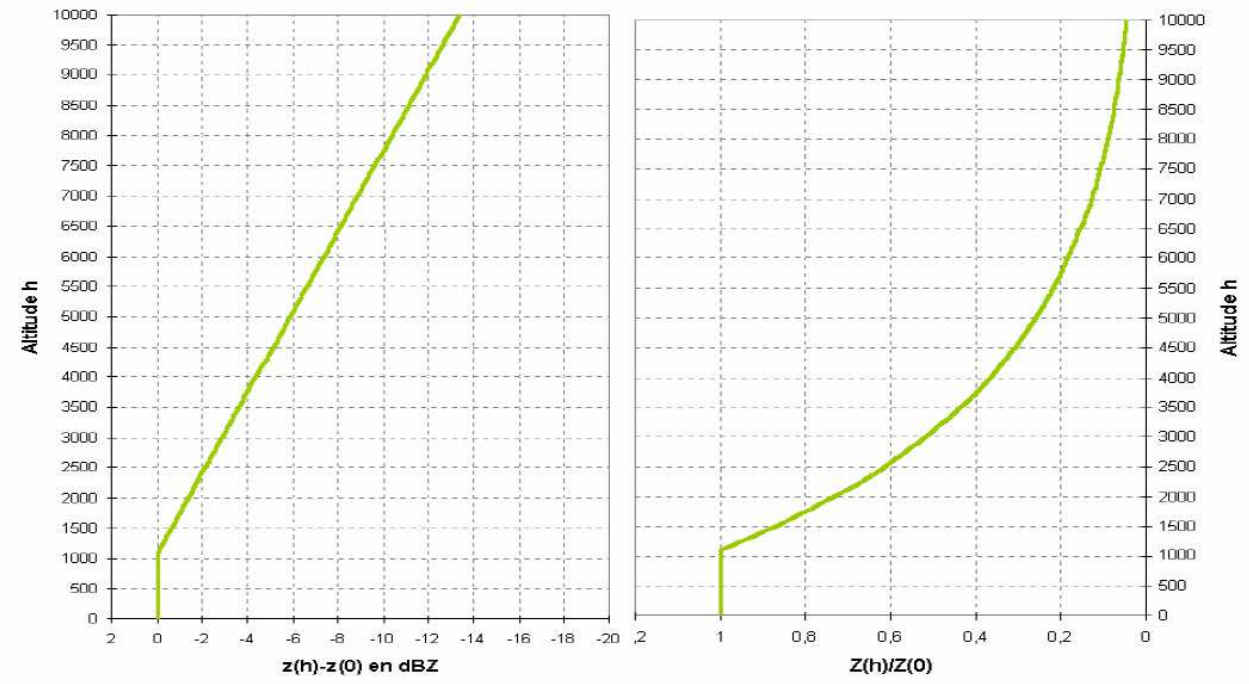


Figure 4.21 : Modèle de PVR utilisé. Il s'agit d'un PVR relatif exprimé sous la forme z(h) - z(href) (à droite), ou Z(h)/Z(href) (à gauche). h est l'altitude de détection d'un élément de l'atmosphère, et href une altitude de référence. Cette altitude est fixée ici au niveau de la mer (source : Faure, 2005)

Ces estimations reposent sur les quatre hypothèses suivantes :

- *1ère hypothèse : La puissance totale mesurée par le radar est la somme des puissances rétrodiffusées par les précipitations et les échos de sol. En conséquence, la réflectivité totale mesurée Z_m (en mm^6/m^3) au dessus du point (x,y) est la somme de la réflectivité Z_r des hydrométéores dans le volume de résolution, et de la contribution (éventuelle) des échos de sol Z_g:*

$Z_m(x,y) = Z_r(x,y) + Z_g(x,y)$

- *2ème hypothèse : La réflectivité Z_r des hydrométéores est définie comme une combinaison de deux fonctions orthogonales qui décrivent la variabilité spatiale de la pluie au niveau du sol (Z_{ro}), et la variabilité verticale de la réflectivité radar Z(h). Pour les simulations, la fonction Z(h) est supposée invariable dans l'ensemble de la couverture radar, et est définie par le modèle de PVR utilisé (fig. 4.21). Ainsi, pour un angle d'élévation φ donné, il est possible de définir une fonction spatiale $Z_{a\varphi}$ qui représente en chaque point (x,y) l'erreur de mesure de Z_{ro} due aux effets du PVR et des masques : $Z_{r\varphi}(x,y) = Z_{a\varphi}(x,y)\ Z_{ro}\ (x,y)$*

$Z_{a\varphi}(x,y)$ est estimée par une intégration numérique détaillée sur chaque volume de résolution, et dépend de l'allure du PVR, de la partie masquée du faisceau radar avant ce volume, et des caractéristiques du faisceau radar (angle d'élévation φ, ouverture à 3dB, diagramme d'antenne).

- *3ème hypothèse : La relation Z-R utilisée pour transformer les réflectivités radar en intensités pluvieuses est choisie de la forme $Z = a R^b$, et le paramètre b est supposé connu et invariable dans l'ensemble de la couverture radar. Dans cette étude, le paramètre b de la relation Z-R a été choisi égal à 1,6 en accord avec la relation moyenne de Marshall-Palmer, 1948, utilisée par Météo-France pour estimer les lames d'eau au sol.*
- *4ème hypothèse : Les phénomènes d'atténuation des ondes radar sur le trajet du faisceau sont négligés.*

A partir de ces quatre hypothèses, il est possible d'exprimer la réflectivité totale mesurée Z_m pour l'angle d'élévation φ au dessus de chaque point (x,y) de la sorte :

$$Z_{m\varphi}(x,y) = Z_{a\varphi}(x,y)\, Z_{ro}(x,y) + Z_{g\varphi}(x,y)$$

L'erreur sur les mesures de réflectivités peut être exprimée en dBZ:

$$\Delta_{z\varphi}(x,y) = 10 \log_{10}[Z_{a\varphi}(x,y) + Z_{g\varphi}(x,y)/ Z_{ro}(x,y)]$$

La valeur de l'erreur affectant les mesures d'intensité pluvieuse R_φ* (en mm/h) pour l'angle d'élévation φ, est le rapport QR_φ défini comme :

$$QR_\varphi(x,y) = R_\varphi(x,y)^*/R(x,y) = [\, Z_{a\varphi}(x,y) + Z_{g\varphi}(x,y) / Z_{ro}(x,y)\,]^{1/b}$$

QR_φ représente la qualité hydrologique de la mesure radar, que l'on appelle aussi la visibilité hydrologique, pour l'angle de site φ (Faure, 2008).

3.2.1.3 Les limites des simulations effectuées

L'approche par simulation utilisée permet de caractériser l'impact de chaque source d'erreur considérée sur la mesure de pluie du radar de Saint-Nizier, tout en reconstituant l'effet cumulé de ces sources d'erreurs qui sont combinées dans les données radar observées. Cependant, ces simulations ne tiennent pas compte de certains phénomènes qui peuvent ne pas être négligeables pour la qualité de la couverture hydrologique des radars en situation opérationnelle.

En effet, les simulations considèrent l'interaction du faisceau principal du radar avec le relief décrit par le MNT. En revanche, elles ne considèrent pas les échos fixes et les masques provoqués par des obstacles de faible volume, situés à proximité immédiate du

radar. Cela est particulièrement vrai pour les masques anthropiques. Cependant, une visite sur le terrain et un survol de la zone par le biais de *Google Earth* et de *Geoportail* a permis de constater l'absence d'obstacles anthropiques de faible volume à proximité du radar.

Ensuite, les lobes secondaires du faisceau radar ne sont pas pris en compte par les simulations. En addition, la propagation des ondes radar est supposée conforme au modèle de propagation standard. Ainsi, les phénomènes de propagation anormale ne sont pas considérés. Les simulations ne prennent pas en compte non plus l'ensemble des sources d'erreur dynamiques au sein des images comme les problèmes d'atténuation par les précipitations, les échos de ciel clair ou encore les phénomènes de bande brillante. Enfin, il doit être gardé à l'esprit que les résultats de simulation ont été obtenus avec le modèle de PVR utilisé par Météo-France (modèle supposé homogène dans l'ensemble de la couverture radar lors des simulations).

3.2.2 Analyse par simulation : résultats

Le relief présent dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier (fig. 4.20) est caractérisé par une dynamique très importante, de quelques dizaines de mètres à plus de 4800 m d'altitude (Mottet, 1997). Cette situation hétérogène se traduit dans les résultats des simulations par des échos fixes (fig. 4.22) et des masques (fig. 4.23) très importants.

À l'échelle de la couverture totale du radar, les échos fixes sont présents sur les reliefs Alpins et les plus élevés du Massif Central. Nous retrouvons trois masques considérables qui ne dépassent tout de même pas plus de 60 % de la puissance du faisceau masqué. Ces masques se situent aux azimuts 13°N, 227°N, et 340° N.

Finalement, nous obtenons la qualité hydrologique de la mesure radar par simulation, c'est-à-dire sa visibilité hydrologique simulée (fig. 4.24). Cette visibilité nous informe clairement de la dégradation de la mesure avec la distance au radar et dans les zones de relief (Delrieu et Pellarin, 2002).

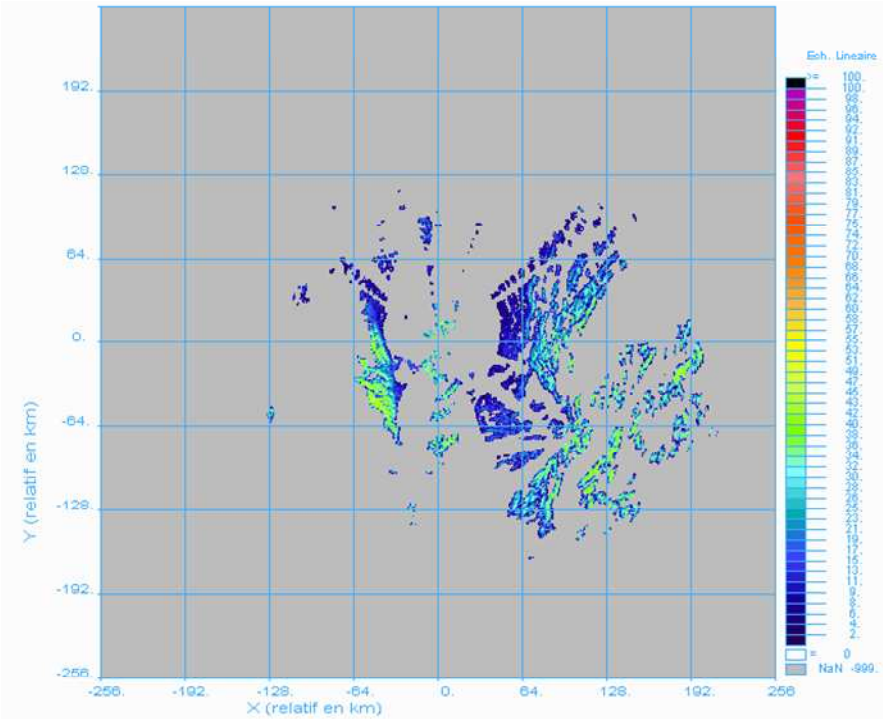


Figure 4.22 : Simulation de l'intensité des échos de sol dans les images du radar de Saint-Nizier. Echelle linéaire exprimée en dBZ (source : Faure, 2008)

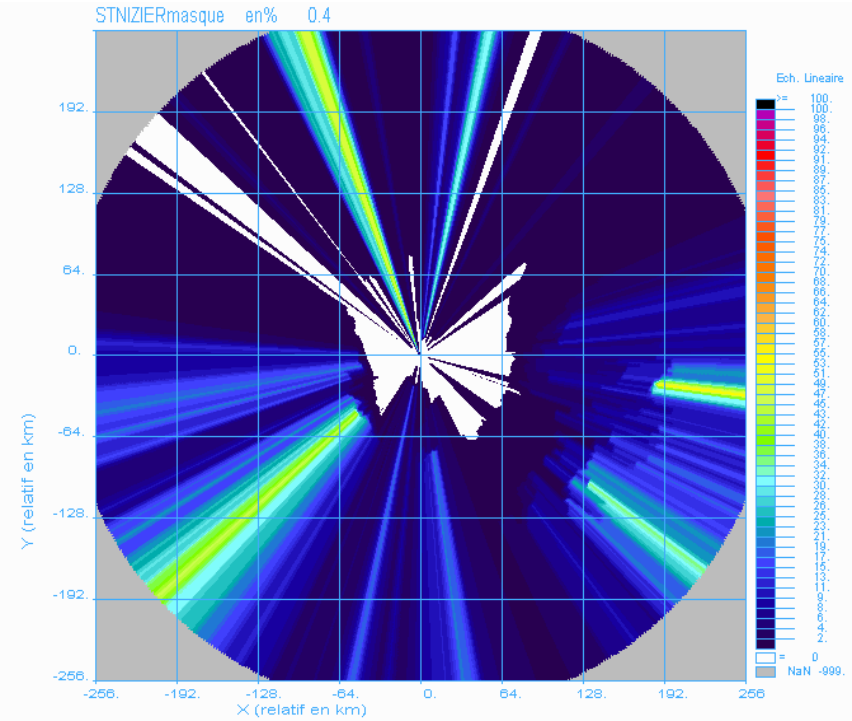


Figure 4.23 : Simulation de l'importance des masques dans la vision du radar de Saint-Nizier. Echelle linéaire exprimée en pourcentage de puissance du faisceau masquée (source : Faure, 2008)

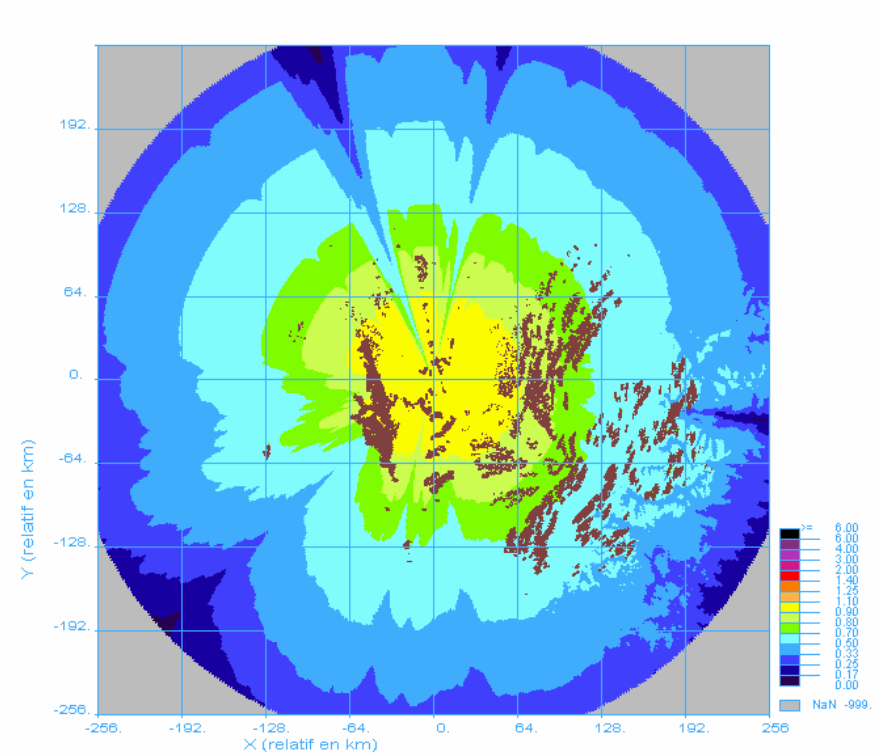


Figure 4.24 : Simulation de la visibilité hydrologique du radar de Saint-Nizier pour le modèle de PVR utilisé (source : Faure, 2008)

Echelle exprimée en rapport « mesure erronée/valeur réelle » des intensités de pluie en mm/h : jaune = très bonne qualité ; vert puis bleu = sous-estimation croissante. Les pixels d'échos fixes dont la valeur est jugée pénalisante pour l'exploitation hydrologique ont une qualité nulle et apparaissent en brun.

Nous pouvons en déduire que l'agglomération urbaine lyonnaise est située dans la zone d'excellente visibilité du radar. Néanmoins, bien que les masques soient négligeables sur le territoire du Grand Lyon, un nombre significatif de pixels devraient avoir une qualité de mesure hydrologique réduite en raison d'échos fixes. En effet, l'est de l'agglomération est signalée impactée par des échos de sol épars, de même que les Monts d'Or et la colline de Fourvière (fig. 4.22 et, 4.24). La carte des échos fixes simulés du Grand Lyon (fig. 4.25) est à rapprocher de la figure 4.10 qui porte sur les différents angles d'élévation des lames d'eau de la génération *Panthere*. Ces deux cartes coïncident fortement. En effet, les zones d'échos fixes simulés correspondent aux zones où l'angle de site est le plus élevé. Cela constitue en sorte une première validation de la fiabilité des résultats obtenus par simulation. En conséquence et pour compléter cette première étude, il est maintenant nécessaire d'effectuer une analyse de la qualité de mesure hydrologique du radar de Saint-Nizier à partir des données réelles.

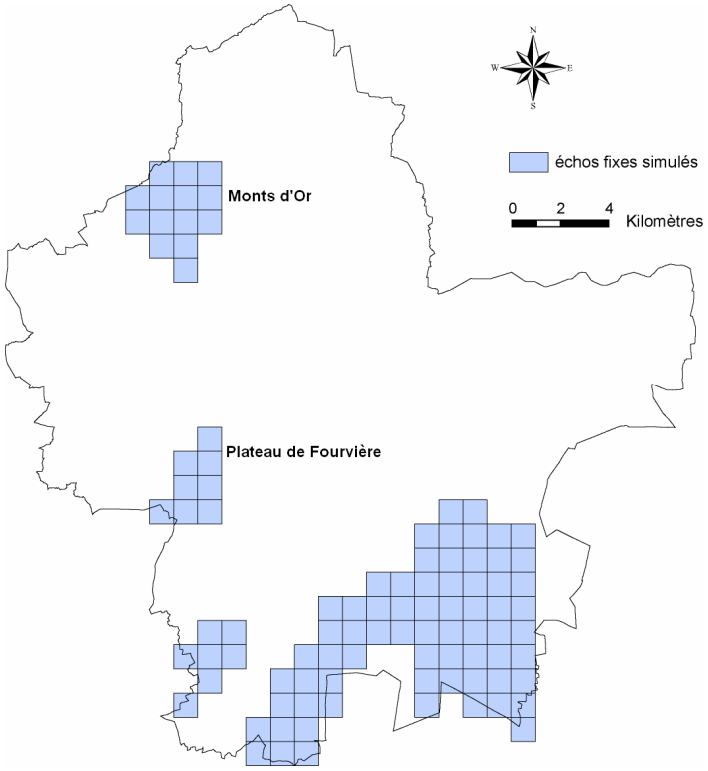


Figure 4.25 : Résultat de la simulation des échos fixes sur le Grand Lyon. Les Monts d'Or, le plateau de Fourvière et le sud-est de l'agglomération se trouvent impactés. Ces zones coïncident avec celles de la figure 4.12 qui représentent les secteurs où l'angle de site est le plus élevé.

3.2.3 Une analyse par données réelles concordante

Les résultats de l'étude par simulation concluent que le Grand Lyon est situé en zone d'excellente visibilité du radar de Saint-Nizier. Cependant, un certain nombre de pixels devraient être impactés par des problèmes d'échos fixes. Ces zones seraient situées dans les Monts d'Or, sur le plateau de Fourvière et dans le sud-est de l'agglomération. Ainsi, les résultats de la simulation se doivent d'être confrontés aux études fondées sur l'utilisation des données réelles. Pour cela, les deux types de données déjà écrites vont être utilisées. Il s'agit des données de réflectivité et des lames d'eau *Hydram*.

Dans l'objectif de repérer les pixels affectés de problèmes d'échos fixes concernant la période 2001-2006, l'ensemble des données radars en notre possession pour cette période va être cumulé. De cette manière, les pixels victimes d'échos fixes ressortiront avec des valeurs de hauteur d'eau aberrantes. Les données dont nous disposons sont l'ensemble des journées affectées par des épisodes remarquables de notre échantillon depuis 2001 (tableau 4.8), soit 17 événements pluvieux remarquables. Nous disposons en outre quelquefois des

jours suivants, pour avoir un aperçu de la continuité de l'événement. Nous disposons pour ces 41 journées des données de réflectivité (au pas de temps de 5 minutes) et des données de lames d'eau (au pas de temps de 15 minutes).

Dates	Episode remarquable en termes de
14/07/2001	Hauteur d'eau
15/07/2001	
22/09/2001	Durée
23/09/2001	
01/05/2002	Hauteur d'eau / Durée
02/05/2002	
16/07/2002	Durée
09/09/2002	Intensité
19/09/2002	Intensité
16/10/2002	Durée
17/10/2002	
23/11/2002	Hauteur d'eau / Durée
24/11/2002	
01/12/2003	Hauteur d'eau / Durée
02/12/2003	
03/12/2003	
04/12/2003	
05/12/2003	
06/12/2003	
07/12/2003	
08/12/2003	
13/03/2004	Hauteur d'eau
23/07/2004	Intensité
04/08/2004	Intensité
17/08/2004	Hauteur d'eau
25/10/2004	Hauteur d'eau
26/10/2004	
07/04/2005	Durée
08/04/2005	
14/04/2005	
15/04/2005	Hauteur d'eau / Durée
16/04/2005	
17/04/2005	
18/04/2005	
19/04/2005	
20/04/2005	
21/04/2005	
22/04/2005	
23/04/2005	
24/04/2005	
29/07/2005	Intensité

Tableau 4.8 : Echantillon de journées radar correspondant aux 17 épisodes pluvieux remarquables de la période 2001-2006

3.2.3.1 Exploitation des données de réflectivité

Le cumul des hauteurs d'eau des données de réflectivité a porté sur 41 journées (tableau 4.8), ce qui représente 11849 pas de temps de cinq minutes. Après un temps de calcul considérable, nous obtenons ainsi un cumul atteignant les 1000 mm de pluie (fig. 4.26). Afin d'effectuer ce cumul, les valeurs de réflectivité radar instantané ont été converties au préalable en équivalent d'intensité de pluie grâce à la relation Z-R de Marshall-Palmer, 1948.

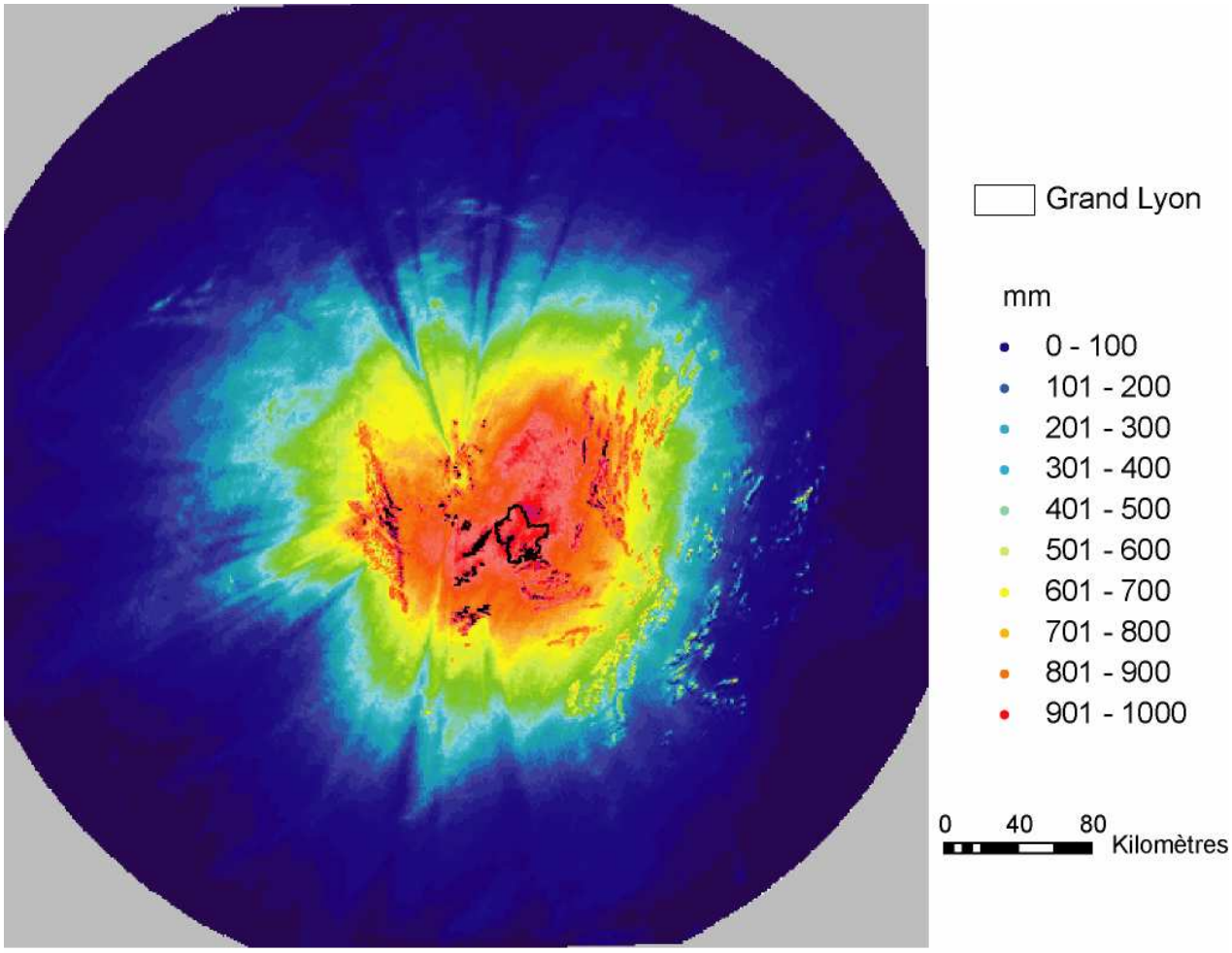


Figure 4.26 : Hauteur d'eau cumulée des données de réflectivité des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006, convertie en équivalent d'eau à l'aide de la relation de Marshall-Palmer, 1948, sur l'ensemble de la couverture du radar

Nous obtenons une très bonne concordance entre ce cumul et les résultats de simulation de la visibilité hydrologique (fig.4.22). Cette hauteur d'eau cumulée permet d'identifier précisément les pixels affectés par des échos fixes et les zones de masques liées à la topographie. La limite maximale pour l'exploitation quantitative hydrologique des mesures radars se situe aux alentours de 100 km, ce qui est une recommandation classique

pour ce genre de radar à bande C. Nous retrouvons en outre les masques déjà signalés lors de l'analyse par simulation, notamment aux azimuts 227°N et 340°N.

Lorsque l'on se focalise sur le territoire du Grand Lyon, nous retrouvons les mêmes zones impactées que celles identifiées par le biais de l'analyse par simulation : les Monts d'Or, le plateau de Fourvière et le sud-est de l'agglomération (fig. 4.27). Ces zones fournissent donc des mesures erronées et seront donc à filtrer avant toute utilisation quantitative hydrologique.

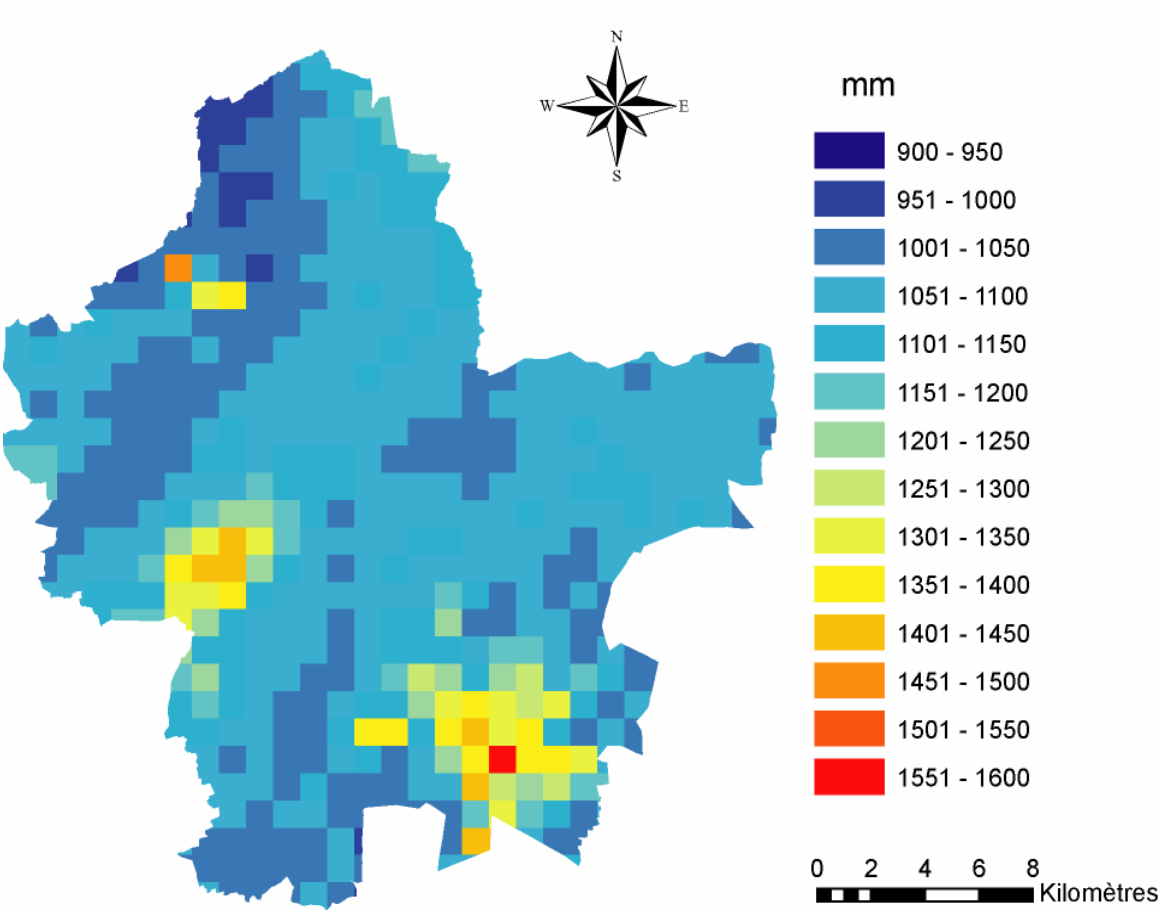


Figure 4.27 : Hauteur d'eau cumulée des données de réflectivité des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006, convertie en équivalent d'eau à l'aide de la relation de Marshall-Palmer, 1948, sur le Grand Lyon

3.2.3.2 Exploitation des données de lames d'eau *Hydram*

La même procédure de cumul est appliquée pour les lames d'eau *Hydram*. Ici, l'ensemble des 41 journées de l'échantillon est cumulé, ce qui représente 3977 pas de temps de 15 minutes (fig. 4.28). La carte de hauteur d'eau produite présente une forte cohérence avec la carte du cumul des données de réflectivité (fig. 4.26). Cependant, nous pouvons remarquer un biais global uniforme dans l'espace de l'ordre de – 30%. Ce biais

s'explique par l'utilisation des facteurs correctifs Ke, Kr ou Kc fournis par Météo-France (cf. paragraphes précédents).

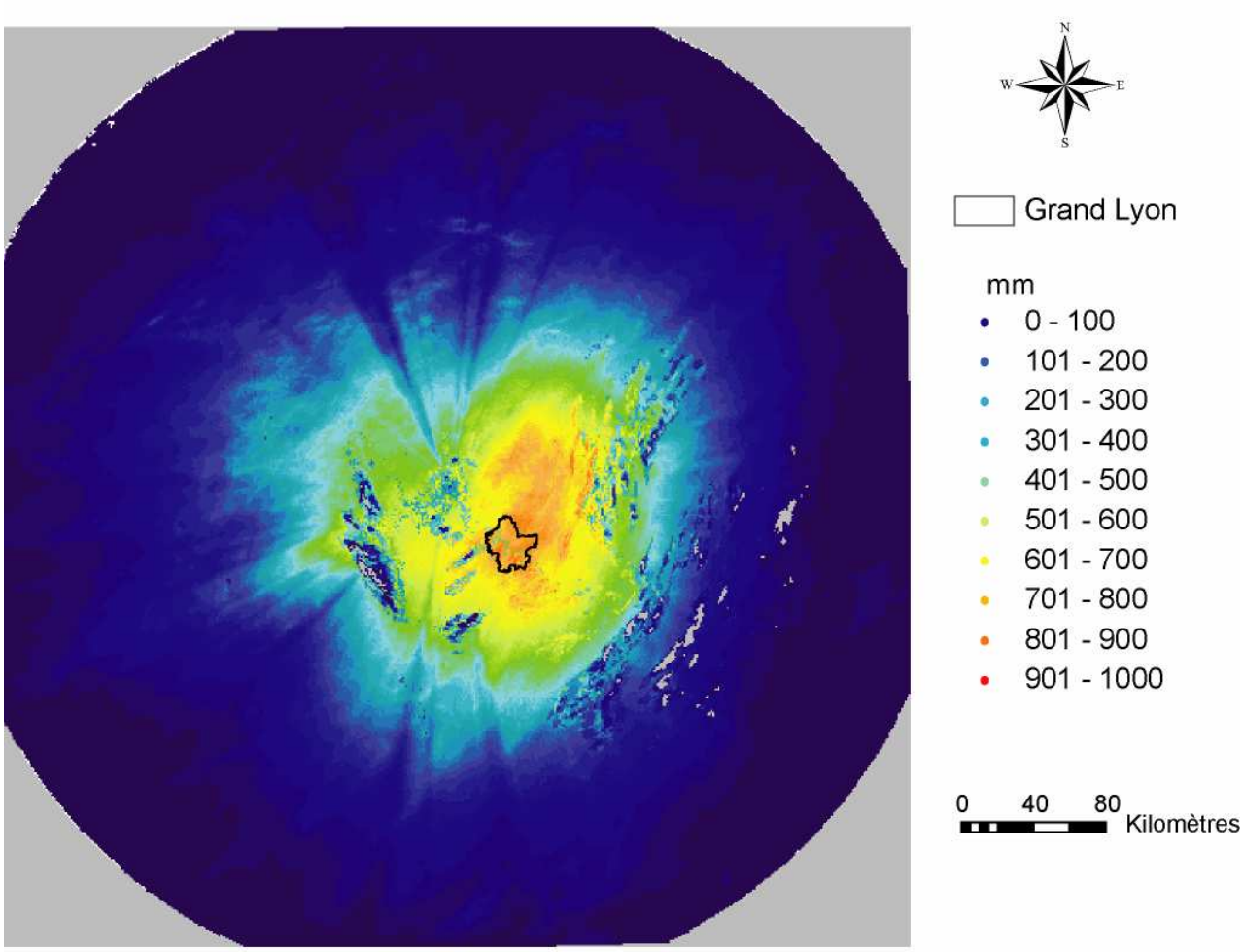


Figure 4.28 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006 sur l'ensemble de la couverture du radar

La focalisation sur la zone d'intérêt nous révèle l'effet néfaste, déjà évoqué auparavant, de l'action de l'éliminateur d'échos fixes (EEF). En effet, il peut être remarqué d'emblée que les zones propices aux échos fixes identifiées à l'aide de la simulation et du cumul des valeurs de réflectivité ont été corrigées, du moins partiellement (fig. 4.29). Mais l'EEF est un outil d'action globale à l'échelle d'action de l'ensemble de la couverture spatiale du radar. De ce fait, les disparités spatiales locales peuvent ne pas être correctement traitées, et ainsi créer des artefacts de mesure problématiques. Si l'impact est très faible sur chaque lame d'eau, il est significatif sur les cumuls de longue durée comme dans ce cas précis.

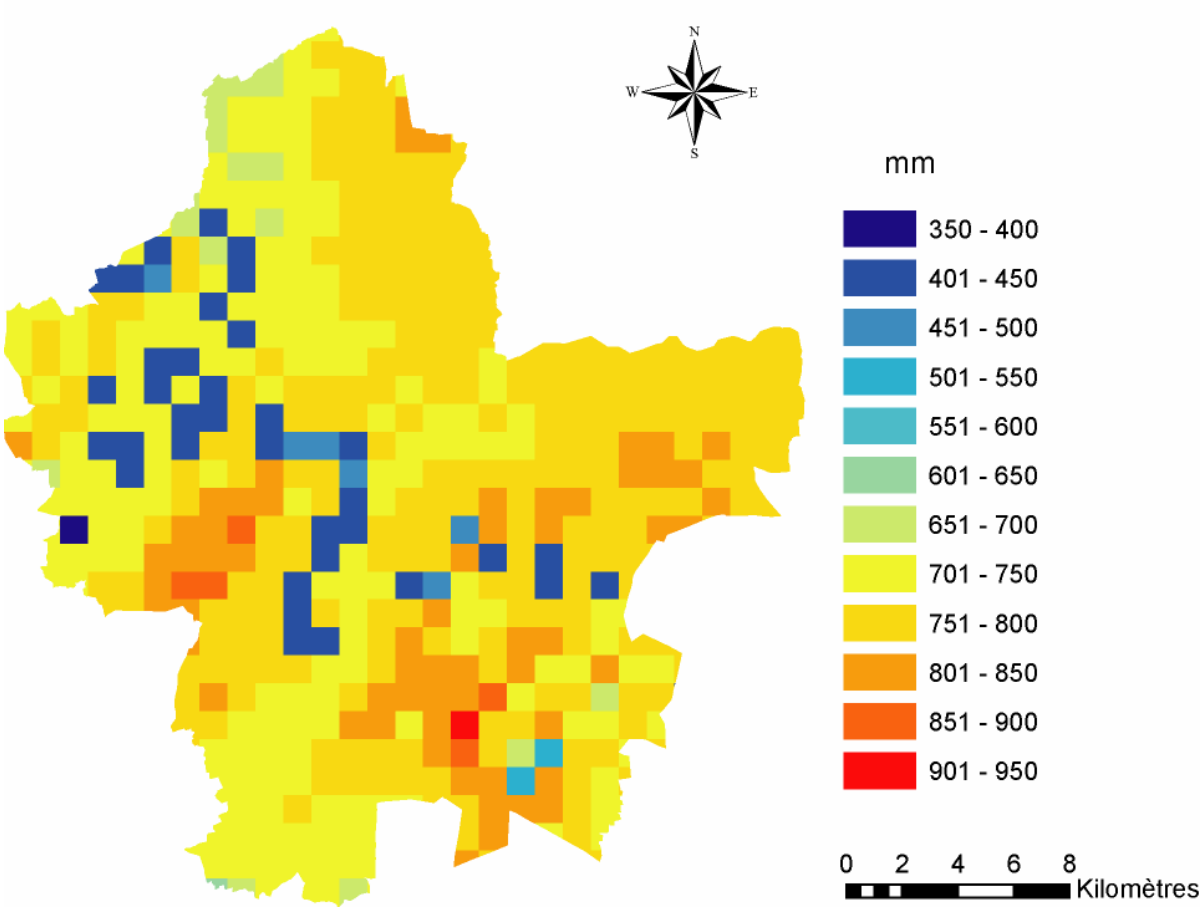


Figure 4.29 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006 sur le Grand Lyon

En effet, l'action de l'EEF sur le Grand Lyon pour ce cumul de forte hauteur d'eau conduit à la dégradation des lames d'eau par deux effets inverses. D'un côté, des valeurs de cumuls pluviométriques peuvent être fortement surestimées à cause d'une absence de filtrage (parfois temporaire) de certains pixels d'échos de sol. C'est ici le cas sur le cumul sur le sud-est de l'agglomération (fig. 4.29), avec un pixel atteignant 950 mm, alors que son voisin direct à l'est en recevrait 200 mm de moins. Cela ne se produit pas seulement sur de très fortes hauteurs d'eau cumulées de plusieurs journées, mais aussi sur des cumuls journaliers, comme lors de l'événement du 1er mai 2002 (fig. 4.30).

D'un autre côté, des valeurs de cumuls pluviométriques peuvent être fortement sous-estimées, à cause d'une action trop radicale de l'éliminateur d'échos fixes de Météo-France. Cela est clairement visible sur la carte du cumul des lames d'eau *Hydram* (fig. 4.29), avec des valeurs qui ne dépassent pas 400 mm. Cette action trop excessive peut même jusqu'à créer des espaces vides dans les estimations des cumuls de lames d'eau au sol, avec une absence de valeur de pluie pour certains pixels pourtant particulièrement arrosés. L'épisode du 1er décembre 2003 est très révélateur de cet effet (fig. 4.31). Cependant, il est toujours

plus facile de traiter une absence de valeur que des valeurs erronées, plus difficiles à détecter.

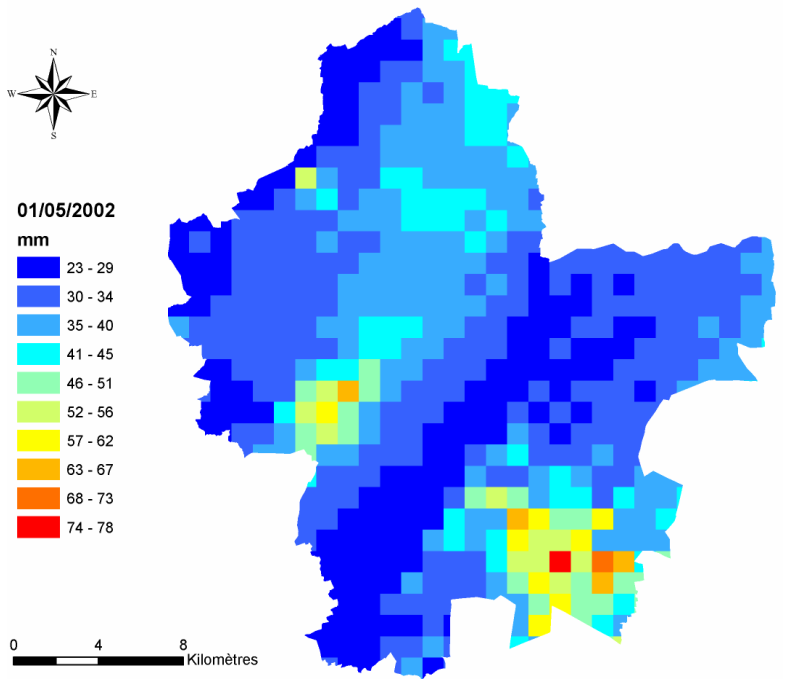


Figure 4.30 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 1er mai 2002. On note des valeurs de pixels fortement surestimées.

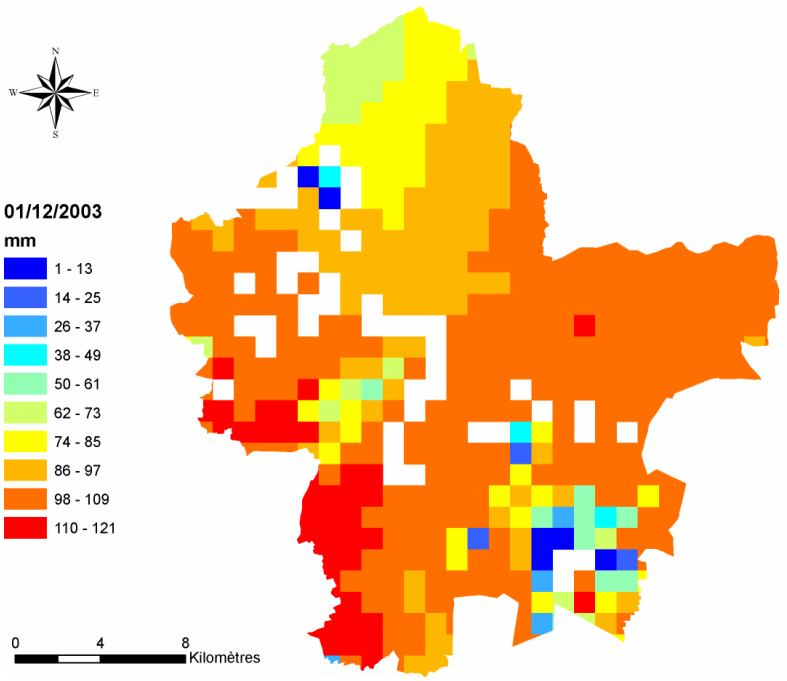


Figure 4.31 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 1er décembre 2003. On note des valeurs de pixels fortement sous-estimés, ainsi que des absence de valeurs dans la zone pluvieuse

En conséquence, il est nécessaire de dresser la liste de tous les pixels jugés peu fiables à partir des conclusions de l'analyse par simulation et des résultats issus des hauteurs d'eau cumulées des données de réflectivité et des lames d'eau *Hydram*. Cette liste est donnée dans le tableau 4.9. Ces échos fixes ont été localisés et sont représentés sur la figure 4.32. Il est donc nécessaire de filtrer ces pixels erronés dans les prochaines études hydrologiques qui utilisent les données de réflectivité et les lames d'eau de la période 2001-2006 (Bertrand-Krajewski et Joannis, 2009).

X	Y
789607	83581
789607	84581
789607	85581
789607	96581
790607	84581
790607	85581
790607	86581
790607	95581
791607	84581
791607	85581
791607	86581
791607	95581
792607	86581
796607	79581
797607	79581
799607	79581
799607	80581
800607	75581
800607	77581
800607	78581
800607	79581
800607	80581
801607	75581
801607	76581
801607	78581
801607	79581
801607	80581
802607	78581
802607	79581
803607	78581
803607	80581
804607	78581

Tableau 4.9 : Coordonnées (Lambert zone II, mètres) du coin haut gauche des pixels radar dont la qualité de mesure hydrologique est jugée peu fiable

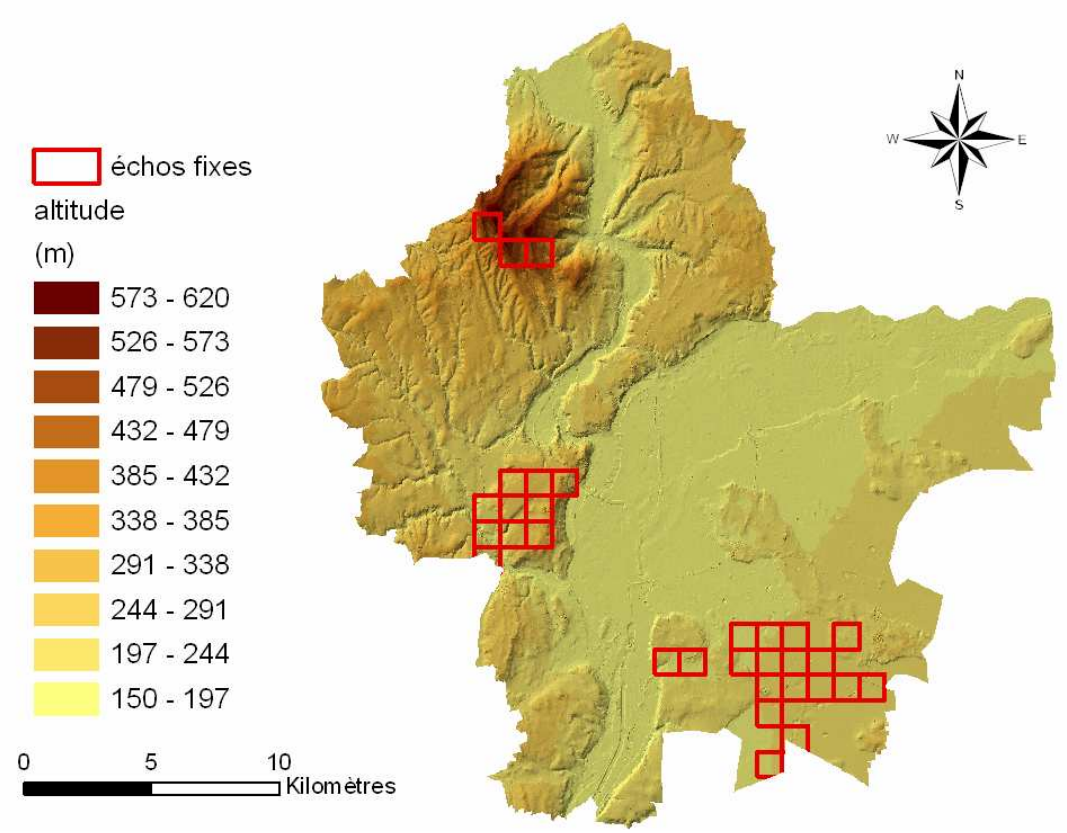


Figure 4.32 : Localisation des échos fixes sur le Grand Lyon pour la période 2001-2006

Les lames d'eau *Hydram* (et les données de réflectivité) ne sont pas uniquement affectées par des problèmes d'échos fixes. Nous avons détaillé dans les paragraphes précédents les limites théoriques de la mesure radar. Ces limites se vérifient, concrètement et d'une manière précise, pour les mesures du radar de Saint-Nizier.

En effet, il arrive que le faisceau du radar rencontre des masses pluvieuses denses qui conduisent à son atténuation, comme durant l'épisode du 29 juillet 2005 à 13h50 (fig. 4. 33). Les sous-estimations à grande distance liées à l'élévation du faisceau se vérifient pratiquement sur chacun des cumuls, le 1er décembre 2003 par exemple (fig. 4.34). Enfin, en période hivernale, il arrive que la mesure soit entachée par un phénomène de bande brillante. Ce fut le cas notamment le 23 novembre 2002 (fig. 4.35).

Une des améliorations de la dernière génération de lames d'eau *Panthere* porte sur l'amélioration de l'efficacité du traitement des problèmes d'échos fixes et des masques. Les problèmes de sous-estimation liés à l'élévation du faisceau ainsi que les phénomènes de bande brillante sont aussi traités. En conséquence, le paragraphe suivant se focalise sur l'évaluation de la qualité de mesure hydrologique de ces dernières lames d'eau.

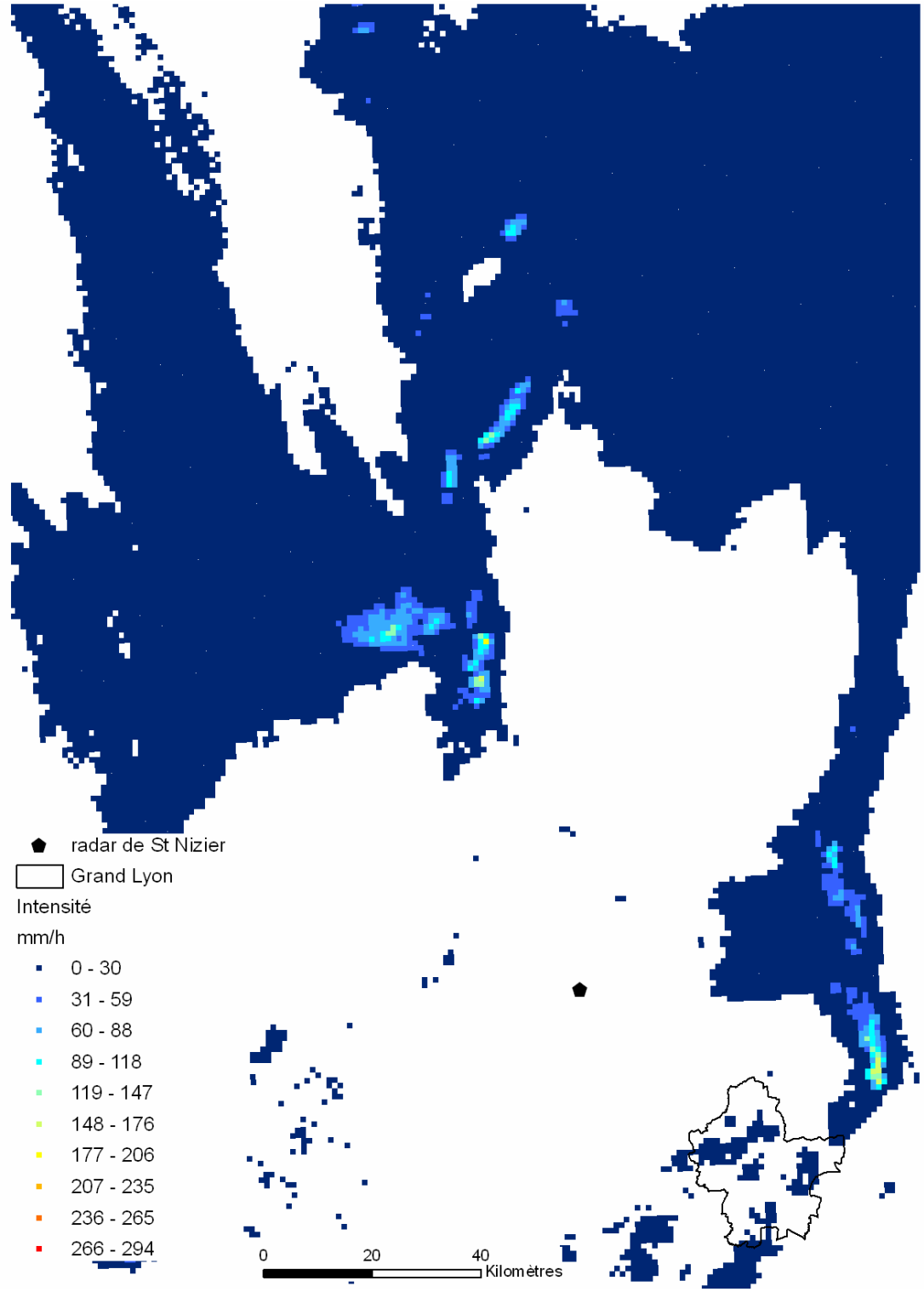


Figure 4.33 : Atténuation par des masses pluvieuses de forte intensité, lors de l'épisode du 29 juillet 2005, à 13h40, au nord-ouest du radar. Cette atténuation ne perturbe pas la mesure sur le Grand Lyon.

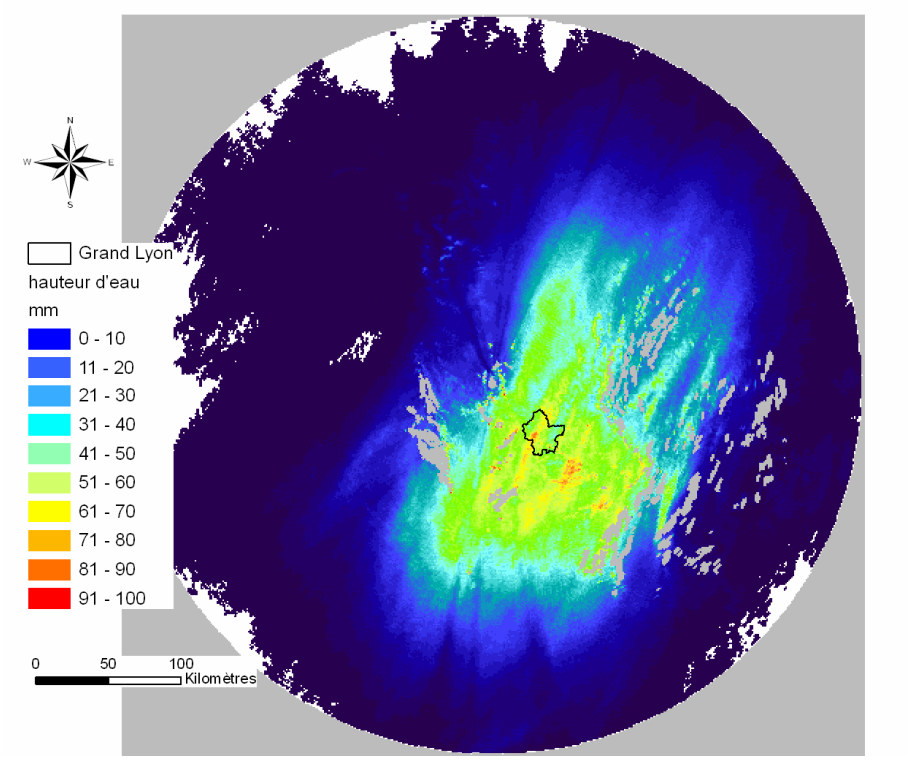


Figure 4.34 : La sous-estimation avec la distance liée à l'élévation du faisceau est manifeste sur la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 1er décembre 2003

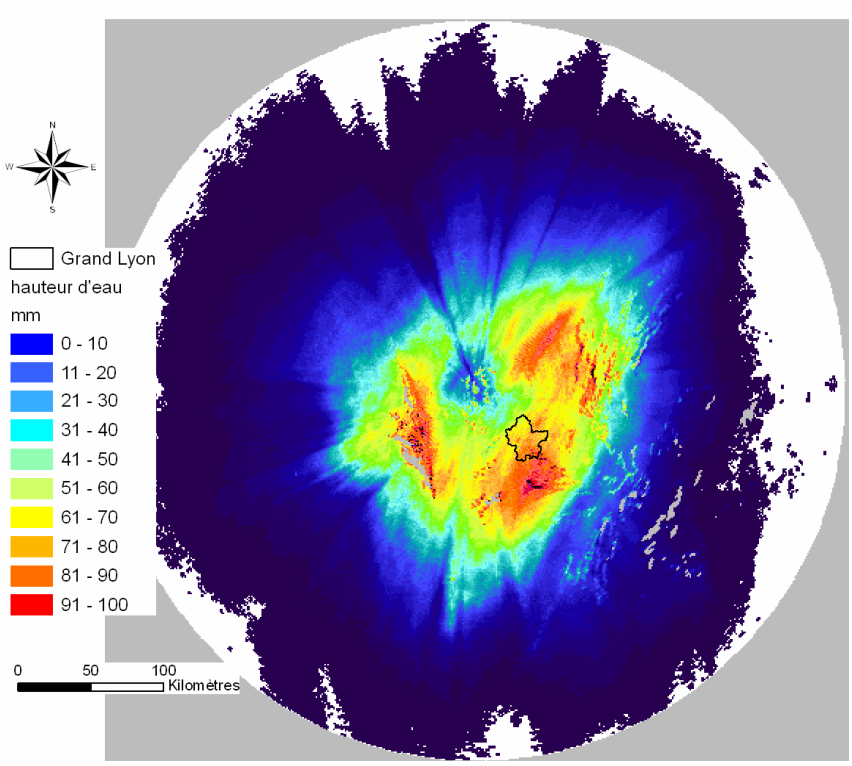


Figure 4.35 : L'effet de bande brillante aux alentours du radar est indéniable sur la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 23 novembre 2002

3.2.3.3 Exploitation des données de lames d'eau *Panthere*

Les lames d'eau *Panthere* sont traitées avec la même procédure de cumul qui a été appliquée aux données de réflectivité et aux lames d'eau *Hydram*. Ici, l'ensemble du mois de juillet 2008, particulièrement pluvieux avec 132,9 mm, est cumulé (fig. 4.36).

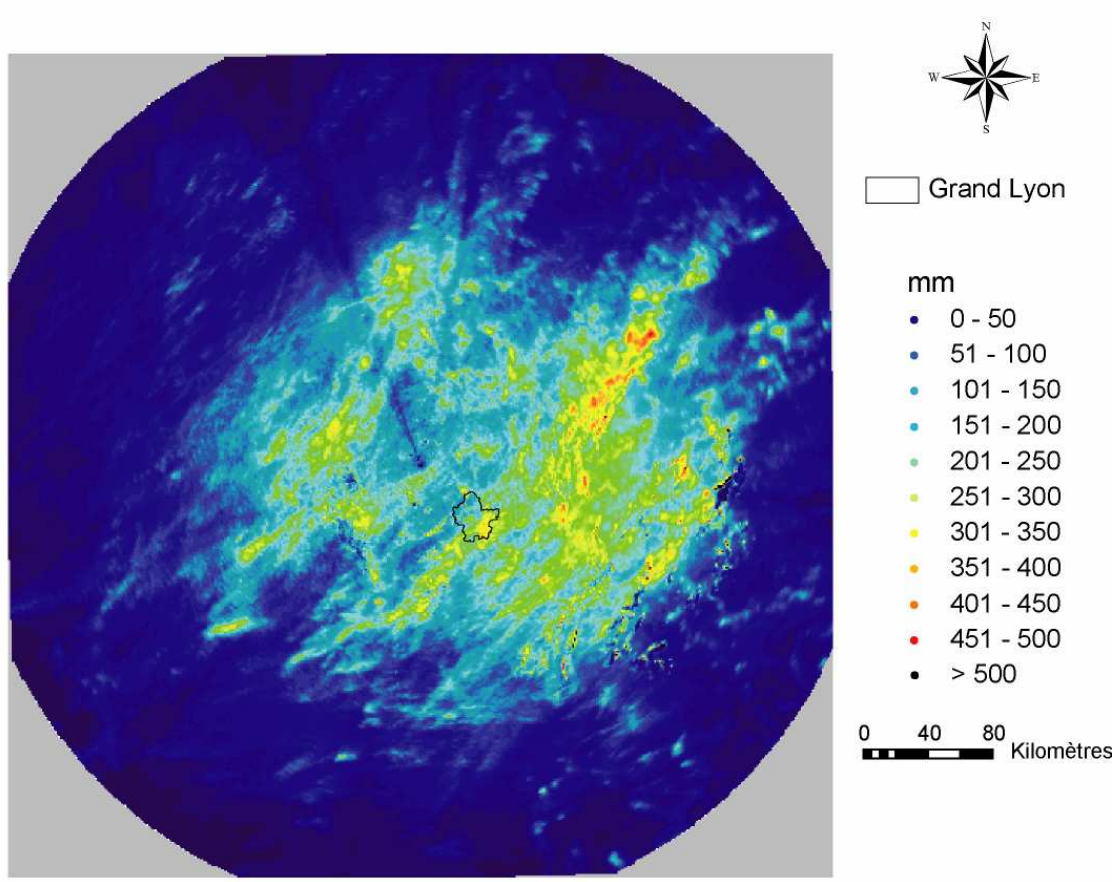


Figure 4.36 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau Panthere *du mois de juillet 2008 sur l'ensemble de la couverture du radar*

En comparaison avec le cumul des données de réflectivité et des lames d'eau *Hydram*, il ressort que les zones affectées par les échos fixes sont grandement corrigées. Il n'en subsiste plus que sur les très hauts reliefs alpins. Les échos fixes du Massif Central présents sur les lames d'eau *Hydram* ne sont plus mis en évidence ici. De la même manière, les masques semblent corrigés par les traitements de Météo-France, sauf pour celui déjà mis en évidence à l'azimut 340°N. Cependant, l'ampleur de ce dernier masque semble tout de même avoir régressé.

A l'échelle du Grand Lyon, les échos fixes précédemment mis en évidence et qui nuisaient à la qualité de mesure hydrologique des lames d'eau *Hydram* ne sont plus visibles (fig. 4.37). Cela est particulièrement vérifié pour les échos qui se trouvaient dans la plaine de

l'est et sur le plateau de Fourvière. Il subsiste tout de même un pixel de qualité douteuse sur les Monts d'Or, avec une valeur aberrante dépassant les 450 mm. Ce pixel de coordonnées [789300 ; 96800] (Lambert Zone II, en mètres) correspond au Mont Verdun qui culmine à 625 mètres, le plus haut sommet du Grand Lyon, et se doit d'être filtré dans les études hydrologiques ultérieures.

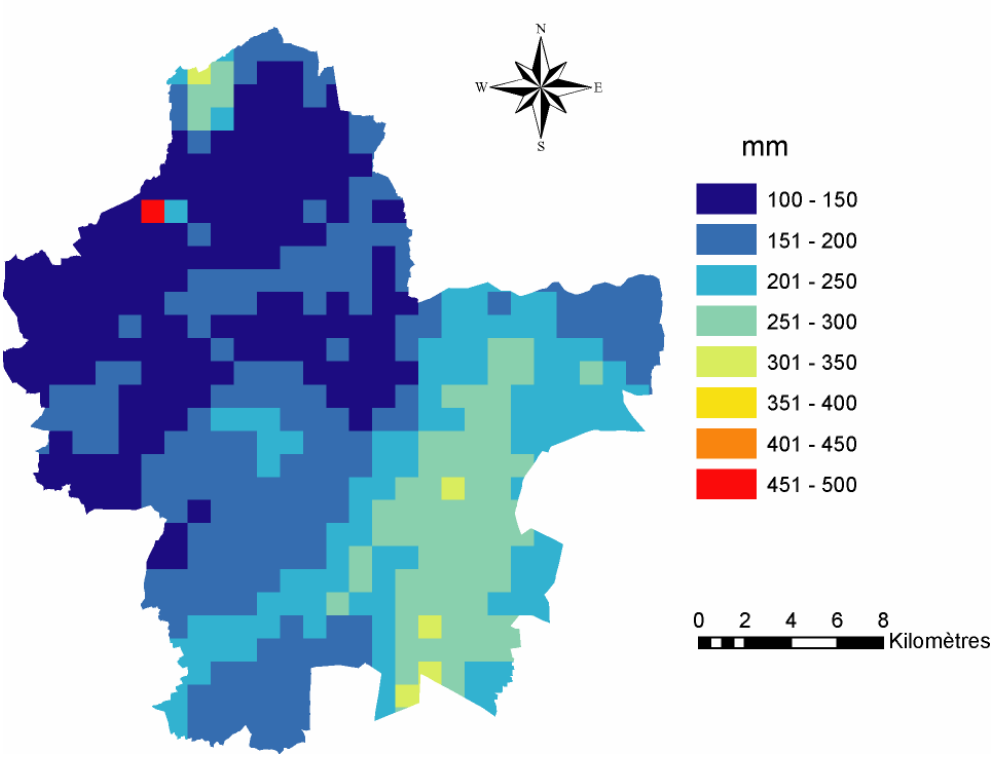


Figure 4.37 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau du mois de juillet 2008 sur le Grand Lyon

Depuis l'installation du radar, Météo-France s'est donc toujours employée à améliorer en continu la qualité de mesure hydrologique de son radar. La qualité douteuse du radar de Satolas a laissé la place aux lames d'eau *Hydram*. Ces dernières, de bien meilleure facture, comportaient tout de même des zones affectées par des échos fixes à filtrer avant une utilisation hydrologique.

Ces zones concernaient pour la plupart les secteurs de relief du Grand Lyon (fig. 4.32), comme les Monts d'Or ou le plateau de Fourvière. Cependant, la zone de moindre qualité sur le sud-est de l'agglomération ne présente pas de topographie particulière. Les raisons qui dégradent la mesure radar à cet emplacement sont donc plus obscures. Après des discussions avec les responsables locaux et centraux de Météo-France et des spécialistes de la mesure radar, les causes exactes ne sont toujours pas connues.

Une des hypothèses était qu'un des lobes secondaires du faisceau venait impacter l'onde principale. Cependant, à une distance si peu éloignée du radar, cette explication n'est

guère plausible. Il serait aussi possible que des émissions d'ondes électromagnétiques de nature militaire, liées à la navigation aéroportuaire ou aux télécommunications puissent entraver la mesure radar. Après croisement des zones d'échos fixes avec ces zones d'émissions électromagnétiques, aucun recoupement n'a pu être effectué (fig. 4.38). Cependant, ces secteurs posent véritablement un problème, si bien qu'à cet endroit, la nouvelle technique de mesure des lames d'eau *Panthere* se voit contrainte d'y utiliser un angle d'élévation du faisceau plus élevé (fig. 4.10). Ainsi, avec ces dernières lames d'eau, il ne subsiste plus qu'un pixel de moindre fiabilité sur le plus haut sommet du Grand Lyon.

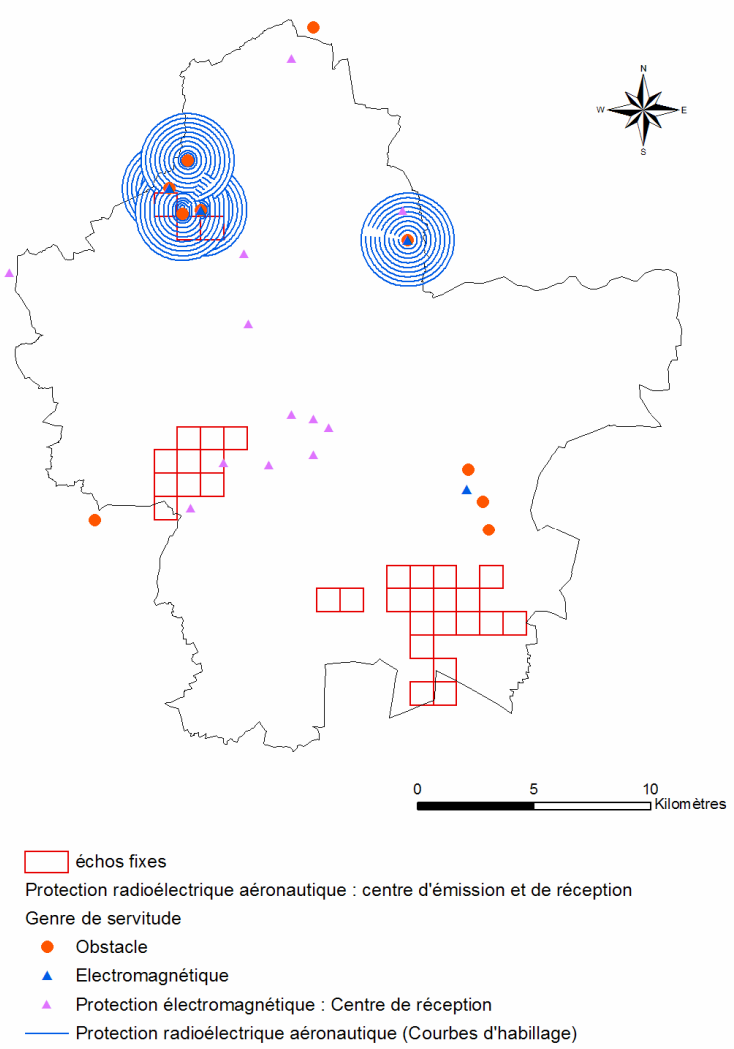


Figure 4.38 : Echos fixes des lames d'eau Hydram *et possibilité d'interactions électromagnétiques et radioélectriques sur le territoire du Grand Lyon (contours issus des servitudes d'utilité publiques (SUP) du plan local d'urbanisme (PLU) du Grand Lyon, 2010)*

Le Laboratoire de Génie Civil et d'Ingénierie Environnementale (LGCIE) de l'INSA de Lyon a mis au point une méthode de détection des pixels douteux à pas de temps fin. Cela

est une nécessité lorsque l'on utilise en entrée de modèle hydrologique des données pluviométriques au pas de temps de cinq minutes. Cette méthode de détection, implémentée dans le logiciel de modélisation hydrologique *Canoe* du LGCIE, repose sur des comparaisons de chacun des pixels du Grand Lyon avec ses voisins les plus proches, à chaque pas de temps (Chesnais et Dorigot, 2009 ; Bruchon et Planchet, 2010 ; Chocat et al., 2010). Les zones affectées par des pixels douteux pour chaque pas de temps sont sensiblement les mêmes que celles obtenues avec les méthodes de détection par simulation et données réelles employées ici.

Certaines zones de l'agglomération présentent donc des pixels de moindre qualité qu'il est nécessaire de filtrer avant toute utilisation hydrologique. Cette étape préalable est indispensable. Une comparaison précise quantitative des estimations du radar aux valeurs pluviométriques au sol est maintenant nécessaire, à large échelle dans un premier temps, puis ensuite d'une manière ponctuelle.

4 Comparaison des valeurs du radar aux données au sol

4.1 Des comparaisons à différentes échelles d'études

4.1.1 Principe de la comparaison surfacique globale

Nous avons vu dans les chapitres précédents que l'agglomération lyonnaise possède un réseau de mesure de la pluie en milieu urbain très dense, avec 29 appareils de mesure. Le principe de la comparaison surfacique globale est de comparer les hauteurs d'eau cumulées moyennes issues des données radars aux valeurs pluviométriques moyennes des épisodes pluvieux retenus (Faure et al., 1997 ; Kirstetter et al., 2009 ; Rubel et Brugger, 2009). Il s'agit de valeurs radars filtrées. En effet, les pixels précédemment jugés peu fiables et dont la liste a été dressée n'ont pas été pris en compte.

4.1.2 *Principe de la comparaison fine ponctuelle*

Cette étude est fondée sur une comparaison ponctuelle des valeurs des hauteurs d'eau par épisodes pluvieux des pixels des données de réflectivité et de lames d'eau du radar aux pluviomètres du réseau (Delrieu et al., 2004). Pour cela, une extraction des valeurs radars ponctuelles (à l'échelle du pixel d'un kilomètre carré) à la verticale des pluviomètres disponibles a été réalisée (figure 4.39). Ces valeurs de pixels radar (réflectivité et lames d'eau) sont ensuite comparées aux données pluviométriques des épisodes pluvieux de l'échantillon.

Cependant, une comparaison pseudo ponctuelle a aussi été menée pour compléter cette étude, comme il est occasionnellement effectué dans la littérature de référence (Pellarin, 2001 ; Delrieu et al., 2006 ; Boudevillain, 2007 notamment). Cette fois-ci, les valeurs pluviométriques ne sont plus directement confrontées aux pixels radars verticalement associés, mais à la moyenne des neuf pixels radars les plus proches du pluviomètre (figure 4.40).

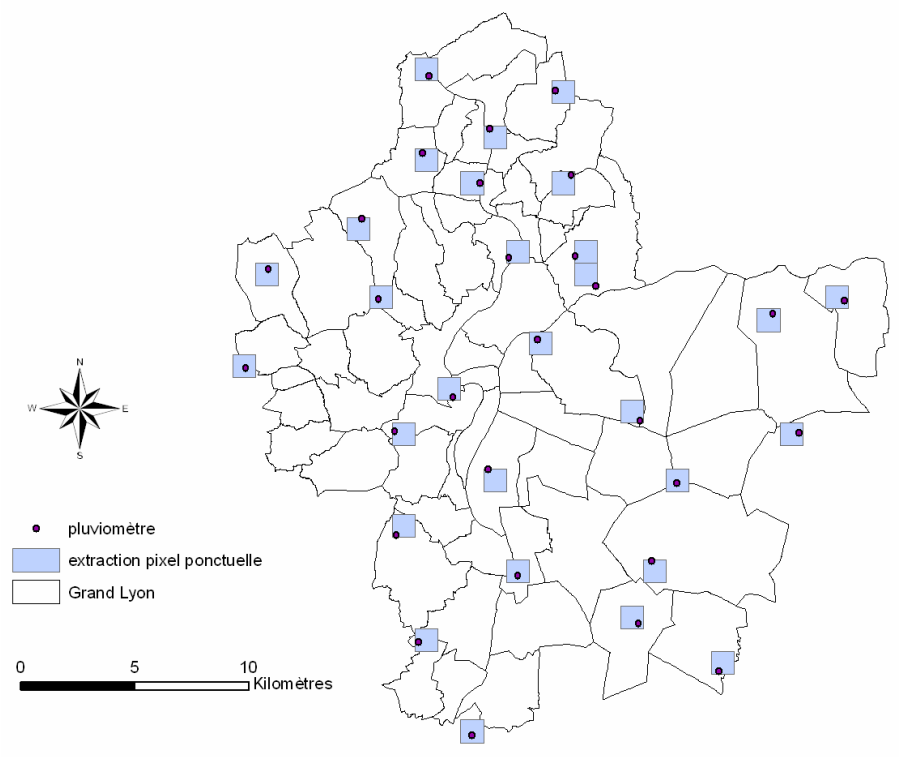


Figure 4.39 : Extraction ponctuelle des pixels radars à la verticale des pluviomètres du Grand Lyon

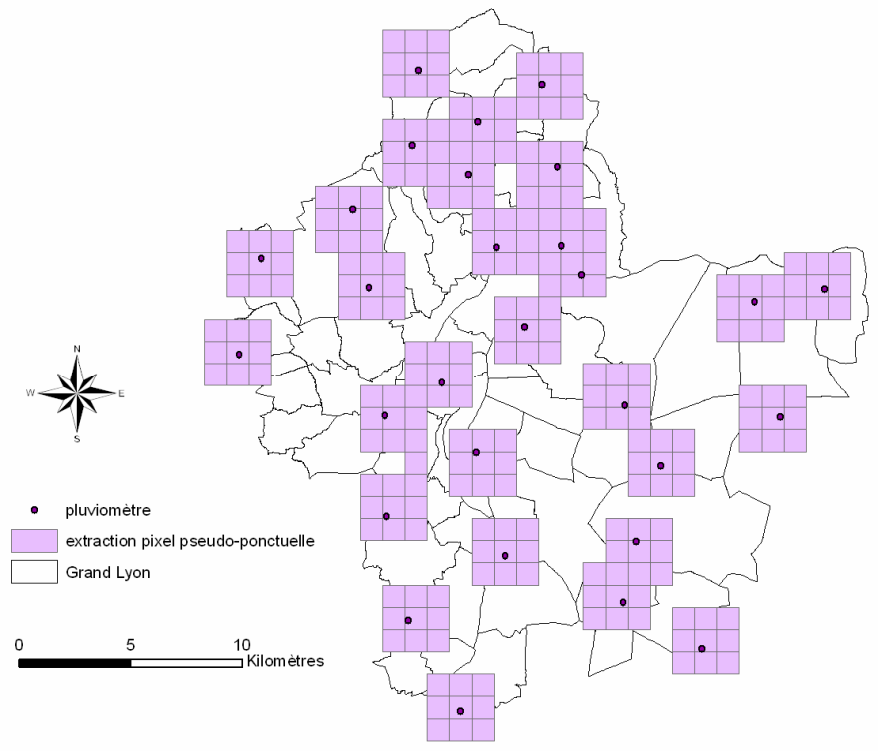


Figure 4.40 : Extraction pseudo ponctuelle des pixels radars à la verticale des pluviomètres du Grand Lyon

4.2 Les résultats encourageants des comparaisons sur la période 2001-2006

Les comparaisons globales et ponctuelles ont porté sur les 17 événements pluvieux remarquables de la période 2001-2005 (tableau 4.8), issus de la précédente sélection d'épisodes remarquables de la période 1988-2005 (cf. chapitres précédents)

4.2.1 La comparaison globale donne des résultats probants

Les valeurs moyennes des cumuls radars (réflectivité et lames d'eau) de ces 17 épisodes pluvieux ont été comparées aux valeurs moyennes de pluie issues des 29 pluviomètres du Grand Lyon.

Les écarts entre les estimations radars et les valeurs pluviométriques présentent une forte ampleur en fonction des épisodes pluvieux. Ce constat est surtout manifeste pour les estimations exploitant les valeurs brutes de réflectivité qui n'ont pas été remises à niveau par les coefficients correctifs de Météo-France, par exemple pour les épisodes du 1er décembre 2003 ou du 25 octobre 2004 (tableau 4.10 et fig. 4.41). Il peut être remarqué que les plus grandes différences entre les moyennes issues des pluviomètres et les moyennes issues des estimations radars se produisent notamment lorsqu'un phénomène de bande brillante est détecté.

En raison de ces écarts entre mesures pluviométriques et estimations radars et afin de faire coïncider les moyennes des hauteurs d'eau des épisodes pour chacune des techniques de quantification, un facteur de remise à niveau globale uniforme dans l'espace (facteur correctif K) a été affecté aux deux types de données radars pour chaque épisode pluvieux. Contrairement à Météo-France qui affecte un facteur correctif mensuellement et qui repose sur l'ensemble des pluviomètres de la couverture radar, ce coefficient est uniquement fondé sur le réseau de mesure au sol du Grand Lyon et est spécifique à chacun des épisodes (tableau 4.11 et fig. 4.42). Ces données radars réajustées ont ensuite été comparées ponctuellement aux valeurs pluviométriques associées, en suivant la méthodologie précédemment décrite.

	Moyenne Pluviomètres	Moyenne Radar Réflectivité (Z)	Moyenne Radar Lame d'eau (LE)	Présence de Bandes Brillantes
14/07/2001	62,1	62,43	43,61	non
22/09/2001	25,23	25,34	21,17	non
01/05/2002	57,99	55,79	34,39	oui
16/07/2002	22,2	7,56	8,36	non
09/09/2002	18,17	11,22	11,51	non
19/09/2002	5,25	5,89	5,94	non
16/10/2002	34,21	27,21	29,77	non
23/11/2002	65,7	61,29	60,65	oui
01/12/2003	116,7	211,46	94,1	oui
13/03/2004	47,8	78,14	48,6	oui
23/07/2004	9,7	7,27	5,55	non
04/08/2004	24,9	15,18	11,45	non
17/08/2004	49,9	58,66	34,5	non
25/10/2004	53,2	121,84	99,16	oui
07/04/2005	34,7	51,48	37,89	oui
15/04/2005	117,9	75,57	53,43	oui
29/07/2005	18,7	23,84	15,25	non

Tableau 4.10 : Moyenne (mm) des cumuls des épisodes pluvieux de la sélection par le réseau pluviométrique et le radar météorologique (valeurs de réflectivité instantanée et de lames d'eau au sol), et présence de bandes brillantes

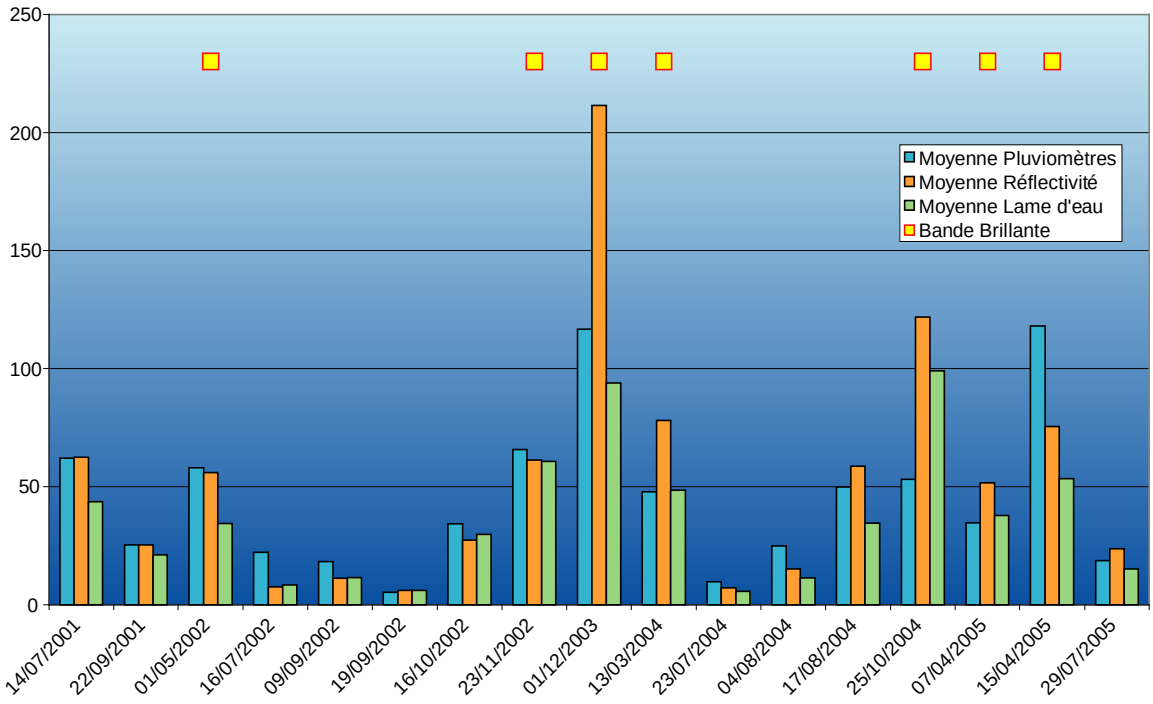


Figure 4.41 : Moyenne (mm) des cumuls des hauteurs d'eau des épisodes pluvieux de la sélection par le réseau pluviométrique et le radar météorologique (valeurs de réflectivité et de lames d'eau au sol), et présence de bandes brillantes

	K Lames d'Eau radar	K Réflectivité radar
14/07/2001	1,42	0,99
22/09/2001	1,28	1,00
01/05/2002	1,76	1,04
16/07/2002	2,85	3,03
09/09/2002	1,64	1,68
19/09/2002	0,83	0,84
16/10/2002	1,15	1,26
23/11/2002	1,10	1,07
01/12/2003	1,18	0,55
13/03/2004	0,92	0,61
23/07/2004	1,74	1,32
04/08/2004	2,14	1,62
17/08/2004	1,44	0,84
25/10/2004	0,54	0,44
07/04/2005	0,92	0,67
15/04/2005	2,26	1,56
29/07/2005	1,22	0,78

Tableau 4.11 : Facteurs de remise à niveau globale (facteur correctif), fondés sur les pluviomètres du Grand Lyon et spécifiques à chacun des épisodes, à affecter aux deux types de données radars

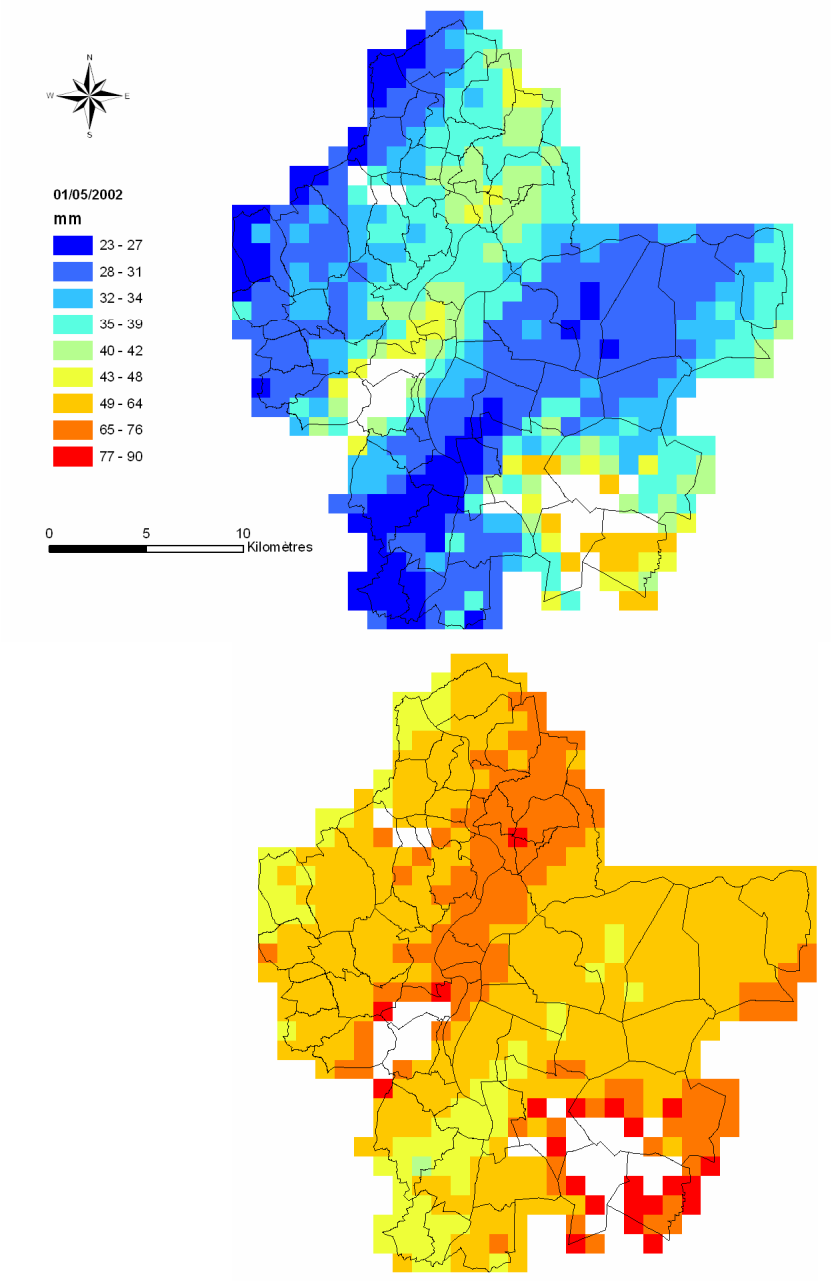


Figure 4.42 : Cumul des hauteurs d'eau des lames d'eau de l'épisode pluvieux du 1er mai 2002 non remis à niveau (en haut), puis remis à niveau (en bas) à l'aide d'un facteur correctif issu des pluviomètres du Grand Lyon

4.2.2 Les résultats de la comparaison fine confirment la qualité satisfaisante des données

Les extractions ponctuelles et pseudo ponctuelles des valeurs de réflectivité et de lames d'eau ont été comparées, au moyen d'écarts absolus et relatifs, aux données issues

du réseau au sol. Cela a été fait pour tous les épisodes pluvieux sélectionnés sur chacun des postes pluviométriques. Le tableau 4.12 présente un aperçu de la comparaison ponctuelle pour l'événement du 1er mai 2002.

Site	Pluviomètre (mm)	Lame d'eau (mm)	Ecart (mm)	Ecart (%)
ST GERMAIN	51,6	44,5	7,1	13,7
MONTANAY	56,6	75,5	18,9	33,4
NEUVILLE	52,8	65,1	12,3	23,3
POLEYMIEUX	52,8	48,9	3,9	7,3
COUZON	56	72,6	16,7	29,8
CAILLOUX	63,4	69,5	6,1	9,7
LIMONEST	55	52,6	2,4	4,3
SALVAGNY	48,2	55,4	7,2	15,0
COLLONGES	65,8	67,4	1,6	2,4
RILLIEUX	63,2	61,0	2,1	3,4
CREPIEUX	62,8	60,0	2,8	4,4
JONAGE	69,4	54,3	15,0	21,6
CHAMPAGNE	53,8	60,0	6,2	11,6
MEYZIEU	59,8	53,6	6,1	10,2
INSA	52,2	53,3	1,1	2,2
LOYASSE	54,8	69,1	14,4	26,2
VILLEURBANNE	55,4	49,8	5,6	10,1
GENAS	65,4	58,9	6,4	9,8
BATTIERE	53,4	74,8	21,4	40,1
BOLLIER	54,2	50,8	3,3	6,2
BRON	65,6	58,7	6,8	10,4
PRESSIN	51,2	56,1	4,9	9,7
ST PRIEST	60,4	68,8	-8,4	13,9
PIERRE BENITE	53	44,7	8,3	15,7
ST GENIS	55,8	47,3	8,5	15,2
CORBAS	59,2	80,0	20,9	35,3
MIONS	68	85,7	17,7	26,0
SEREZIN	63,8	50,8	12,9	20,3

Tableau 4.12 : Comparaison ponctuelle de la valeur du pluviomètre à celle du pixel radar pour l'épisode pluvieux du 1er mai 2002 (pour l'ensemble des pluviomètres fonctionnels à cette date)

D'une manière globale et sans faire de distinction entre les épisodes, l'écart moyen relatif entre les valeurs pluviométriques et les données radar de lames d'eau est de 6,4 mm, soit 20,4 %. Cet écart passe à 7,2 mm, soit 23,3 %, lorsque l'on s'intéresse à l'écart moyen relatif entre les valeurs pluviométriques et les données radar de réflectivité (tableau 4.13). Les écarts issus de la comparaison pseudo ponctuelle sont quasiment identiques à ceux issus de la comparaison ponctuelle. La différence est presque négligeable et se situe toujours à environ 1 % de l'écart relatif dans tous les cas.

Types de données radar	Lames d'eau	Réflectivité
Ecart absolu (mm)	6,4	7,2
Ecart relatif (%)	20,4	23,3

Tableau 4.13 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau ou réflectivité radar pour l'ensemble des épisodes pluvieux de l'échantillon

Les tableaux 4.14, 4.15 et 4.16 présentent les résultats des écarts moyens absolus (en mm) et relatifs (en %), entre valeurs pluviométriques et valeurs des pixels des lames d'eau radar, respectivement pour les épisodes remarquables en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes, en termes de hauteur d'eau totale moyenne précipitée, et en termes de durée.

	09/09/2002	04/08/2004	23/07/2004	19/09/2002	29/07/2005
Ecart absolu (mm)	6,8	8,7	5,6	2,2	3,1
Ecart relatif (%)	40,7	35,0	57,6	38,2	16,5
Hauteur totale moyenne précipitée (mm)	16,6	24,9	9,7	5,7	18,7

Tableau 4.14 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau radar, pour les épisodes remarquables en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes

	01/12/03	15/04/05	23/11/02	14/07/01	01/05/02	25/10/04	17/08/04	13/03/04
Ecart absolu (mm)	11,0	15,1	4,3	6,3	8,3	6,6	4,2	9,7
Ecart relatif (%)	9,3	12,8	6,5	10,5	14,3	12,4	8,4	20,3
Hauteur totale moyenne précipitée (mm)	118,1	117,9	66,3	60	57,8	53,2	49,9	47,6

Tableau 4.15 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau radar, pour les épisodes remarquables en termes de hauteur totale moyenne précipitée

	07/04/2005	22/09/2001	16/07/2002	16/10/2002
Ecart absolu (mm)	2,6	3,8	6,2	4,7
Ecart relatif (%)	7,6	14,7	28,5	13,8
Hauteur totale moyenne précipitée (mm)	34,7	25,9	21,9	34,1

Tableau 4.16 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau radar, pour les épisodes remarquables en termes de durée

De la même manière, les tableaux 4.17, 4.18 et 4.19 présentent les résultats des écarts moyens absolus (en mm) et relatifs (en %) entre valeurs pluviométriques et valeurs des pixels de la réflectivité radar, respectivement pour les épisodes remarquables en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes, en termes de hauteur totale moyenne précipitée, et en termes de durée.

	09/09/2002	04/08/2004	23/07/2004	19/09/2002	29/07/2005
Ecart absolu (mm)	6,6	8,5	5,6	3,3	3,8
Ecart relatif (%)	39,8	34,1	57,3	57,2	20,1
Hauteur totale moyenne précipitée (mm)	16,6	24,9	9,7	5,7	18,7

Tableau 4.17 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et réflectivité radar, pour les épisodes remarquables en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes

	01/12/03	15/04/05	23/11/02	14/07/01	01/05/02	25/10/04	17/08/04	13/03/04
Ecart absolu (mm)	7,8	18,3	5,3	9,0	11,9	6,7	4,6	8,4
Ecart relatif (%)	6,6	15,5	8,0	14,9	20,6	12,5	9,3	17,6
Hauteur totale moyenne précipitée (mm)	118,1	117,9	66,3	60	57,8	53,2	49,9	47,6

Tableau 4.18 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et réflectivité radar, pour les épisodes remarquables en termes de hauteur totale moyenne précipitée

	07/04/2005	22/09/2001	16/07/2002	16/10/2002
Ecart absolu (mm)	4,1	6,6	7,2	4,5
Ecart relatif (%)	11,9	25,3	32,8	13,3
Hauteur totale moyenne précipitée (mm)	34,7	25,9	21,9	34,1

Tableau 4.19 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et réflectivité radar, pour les épisodes remarquables en termes de durée

Ces tableaux qui présentent les écarts en fonction de la nature de la donnée (lames d'eau ou réflectivité), et en fonction du type d'événements pluvieux (remarquable en termes d'intensité, de hauteur totale d'eau précipité ou de durée) indiquent que ces écarts varient selon la nature de la donnée, mais aussi en fonction du type d'événement pluvieux, comme synthétisé dans le tableau 4.20 et la figure 4.43.

Type de données / événements	Moyennes	Intensité	Hauteur	Durée
Lames d'eau	**Ecart absolu (mm)**	5,3	8,2	7,0
	Ecart relatif (%)	37,6	11,8	13,4
Réflectivité	**Ecart absolu (mm)**	5,5	9,0	8,2
	Ecart relatif (%)	41,7	13,1	16,8

Tableau 4.20 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau ou réflectivité radar, en fonction du type d'épisodes pluvieux remarquables considérés (remarquables en termes d'intensité, de hauteur totale d'eau précipitée ou de durée)

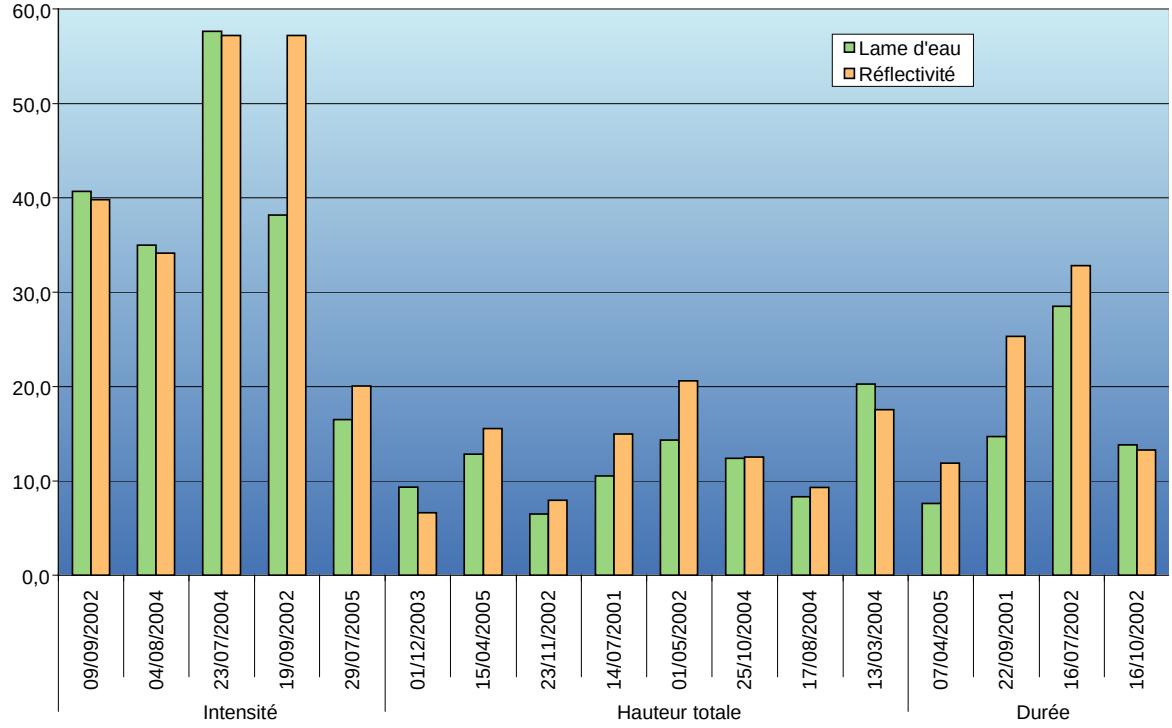


Figure 4.43 : Ecarts moyens relatifs (%) entre pluviomètres et lames d'eau ou réflectivité radar en fonction du type d'épisodes pluvieux remarquables considérés (épisodes remarquables en termes d'intensité, de hauteur précipitée ou de durée)

Ces résultats nous permettent de tirer plusieurs conclusions intéressantes à différents niveaux. D'une manière générale, il n'est pas surprenant de constater la meilleure performance des lames d'eau face aux données de réflectivité. En effet, les lames d'eau présentent un écart moyen avec les valeurs pluviométriques de 20,4 %, qui passe à 23,3 % dans le cas de données de réflectivité. Cela s'explique par le fait que Météo-France prend en compte le déplacement des masses pluvieuses dans ce type de données, au contraire des données de réflectivité sans advection.

Nous constatons en outre que les résultats varient en fonction des types d'épisodes pluvieux, tels que définis précédemment via l'ACP (remarquables en termes d'intensité, de hauteur d'eau ou de durée). En effet, en ce qui concerne les lames d'eau, l'écart relatif pour les épisodes pluvieux exceptionnels en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes est de 37,6%, mais il passe à 13,4% pour les épisodes exceptionnels en termes de durée, et tombe à seulement 11,8% pour les épisodes exceptionnels en termes de hauteur d'eau moyenne précipitée. Ces différences trouvent leurs explications dans le type de distribution spatiale propre à chacune des précipitations remarquables, comme décrit dans les chapitres précédents. Nous avons vu que les précipitations intenses sont provoquées par des noyaux de forte intensité de pluie très localisés, qui peuvent être d'un diamètre très réduit, et d'une vitesse élevée. Le radar aura donc plus de difficulté à les traiter quantitativement, au contraire des précipitations abondantes ou longues, beaucoup plus uniformes dans l'espace et le temps, générant ainsi des champs de pluie plus réguliers.

Ces observations se trouvent vérifiées en confrontant les écarts entre pluviomètres et lames d'eau radar à l'intensité moyenne maximale en 18 minutes des 17 épisodes pluvieux de notre échantillon. On s'aperçoit que l'écart s'accroît en fonction de l'intensité maximale des épisodes (figure 4.44). Lorsque l'on visualise ces mêmes écarts en fonction de la hauteur d'eau précipitée de l'épisode, on constate une diminution de cet écart (figure 4.45). Le même constat est effectué en ce qui concerne l'écart et la durée de l'épisode pluvieux : les différences tendent à s'amenuiser avec la durée de l'événement (figure 4.46).

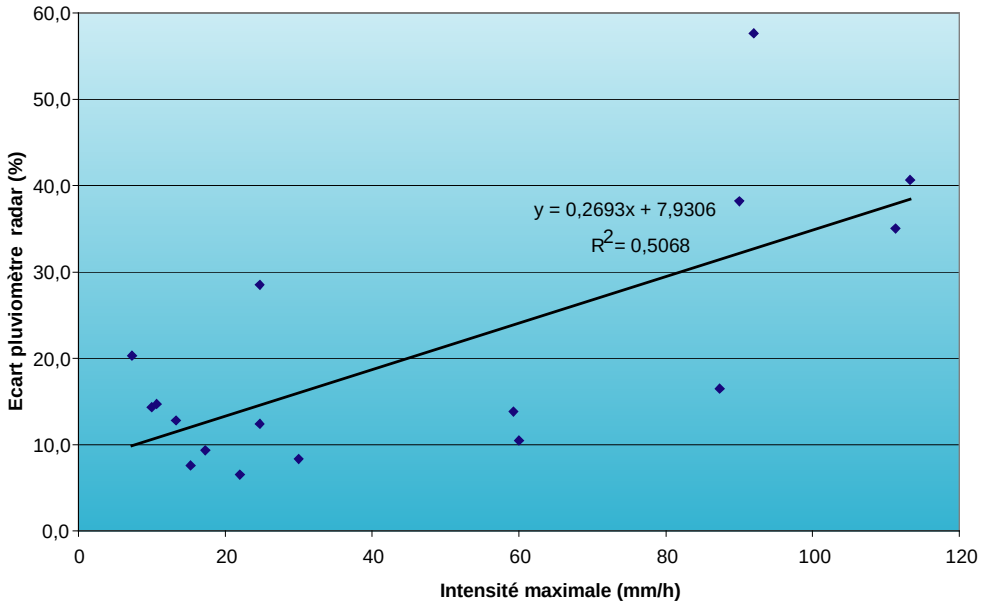


Figure 4.44 : Ecarts moyens relatifs (%) par événements entre pluviomètres et lames d'eau radar en fonction de l'intensité moyenne maximale en 18 minutes (mm/h) de chaque épisode pluvieux

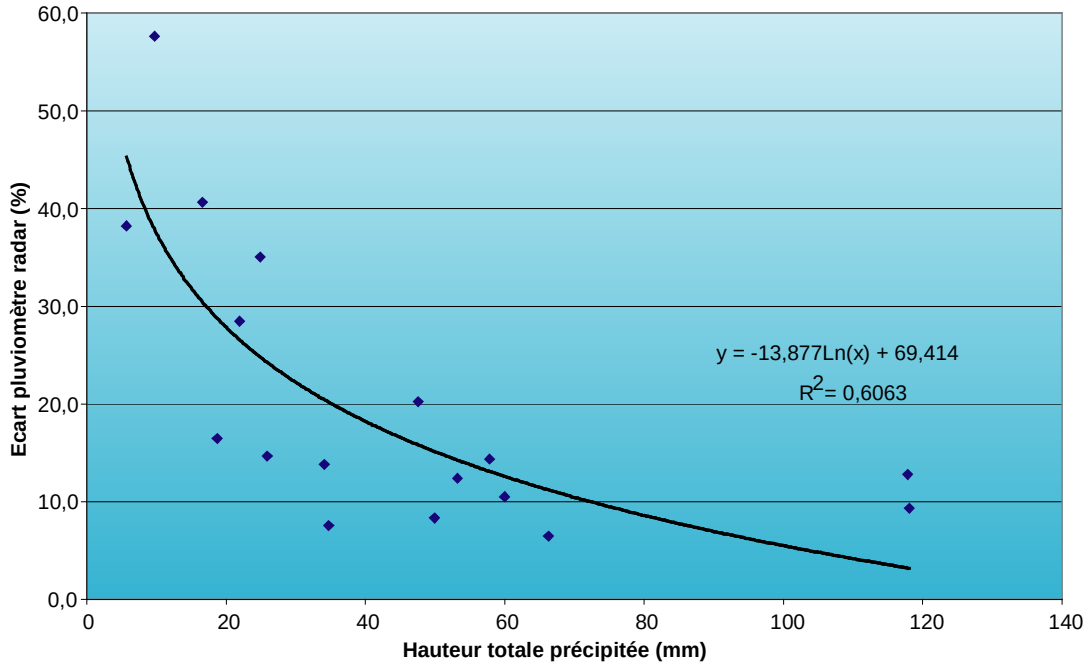


Figure 4.45 : Ecarts moyens relatifs (%) par événements entre pluviomètres et lames d'eau radar en fonction de la hauteur d'eau totale moyenne (mm) de chaque épisode pluvieux

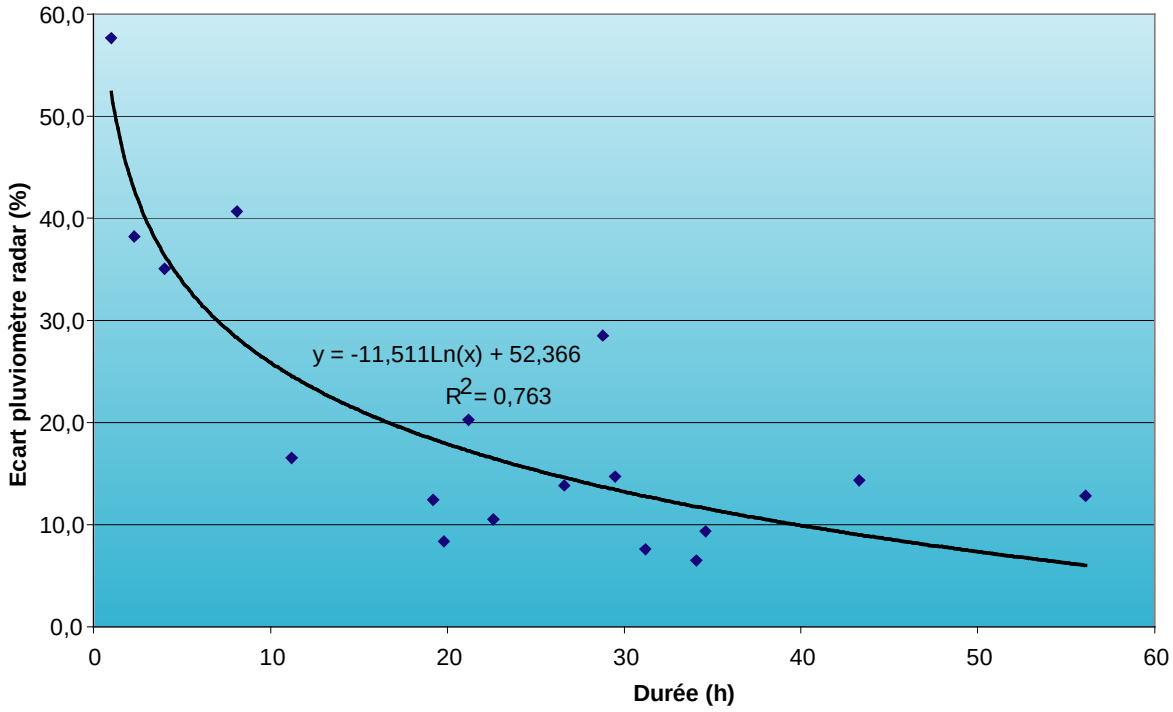


Figure 4.46 : Ecarts moyens relatifs (%) par événements entre pluviomètres et lames d'eau radar en fonction de la durée (h) de chaque épisode pluvieux

D'une manière globale, il peut être conclu que moins l'épisode pluvieux est intense, plus il est abondant et de longue durée, moins les écarts de mesure entre pluviomètres seront forts. À l'inverse, plus l'épisode est intense, plus la hauteur d'eau précipitée est faible et plus il est de courte durée, plus les écarts de mesure seront considérables. Ces résultats sont en accord avec ceux publiés dans la littérature. En particulier avec les études d' I. Emmanuel et al. (2009 et 2010) qui portent sur le radar de Trappes et le bassin versant amont de la Bièvre.

4.3 Les comparaisons globales et ponctuelles des lames d'eau *Panthere* sont satisfaisantes

Nous avons à disposition pour la période post mi-2006 les données de lames d'eau *Panthere* du mois de juillet 2008. Ce mois a été choisi en raison de l'intensité particulièrement élevée des épisodes (à caractère orageux), ainsi que par les dégâts occasionnés, notamment par des grêlons, le onze juillet. Une victime et quatre blessés sont à déplorer ce jour, foudroyés dans l'après-midi à Décines, dans l'est du Gand Lyon (édition du samedi douze juillet du journal local *Le Progrès*). Les comparaisons globales et ponctuelles de la période post mi-2006 ont ainsi porté sur les hauteurs d'eau du mois de juillet 2008 et de quatre épisodes de ce mois (les 03 ; 06 ; 11 et 26).

4.3.1 La comparaison globale fournit des résultats probants

Les valeurs moyennes des cumuls radars de ces épisodes pluvieux ont été comparées aux valeurs moyennes de pluie issues des 29 pluviomètres du Grand Lyon. À la différence des données antérieures à 2006, les écarts entre les estimations radars et les valeurs pluviométriques ne présentent pas une forte amplitude (fig. 4.47). L'effet de l'ajustement des lames d'eau *Panthere* pour chacun des épisodes, de la part de Météo-France et à l'aide de leur réseau de mesure au sol, est clairement visible. De la même manière que pour les lames d'eau *Hydram*, un coefficient correcteur d'ajustement fondé sur le réseau de mesure

au sol du Grand Lyon est affecté aux lames d'eau *Panthere* pour passer à la comparaison ponctuelle.

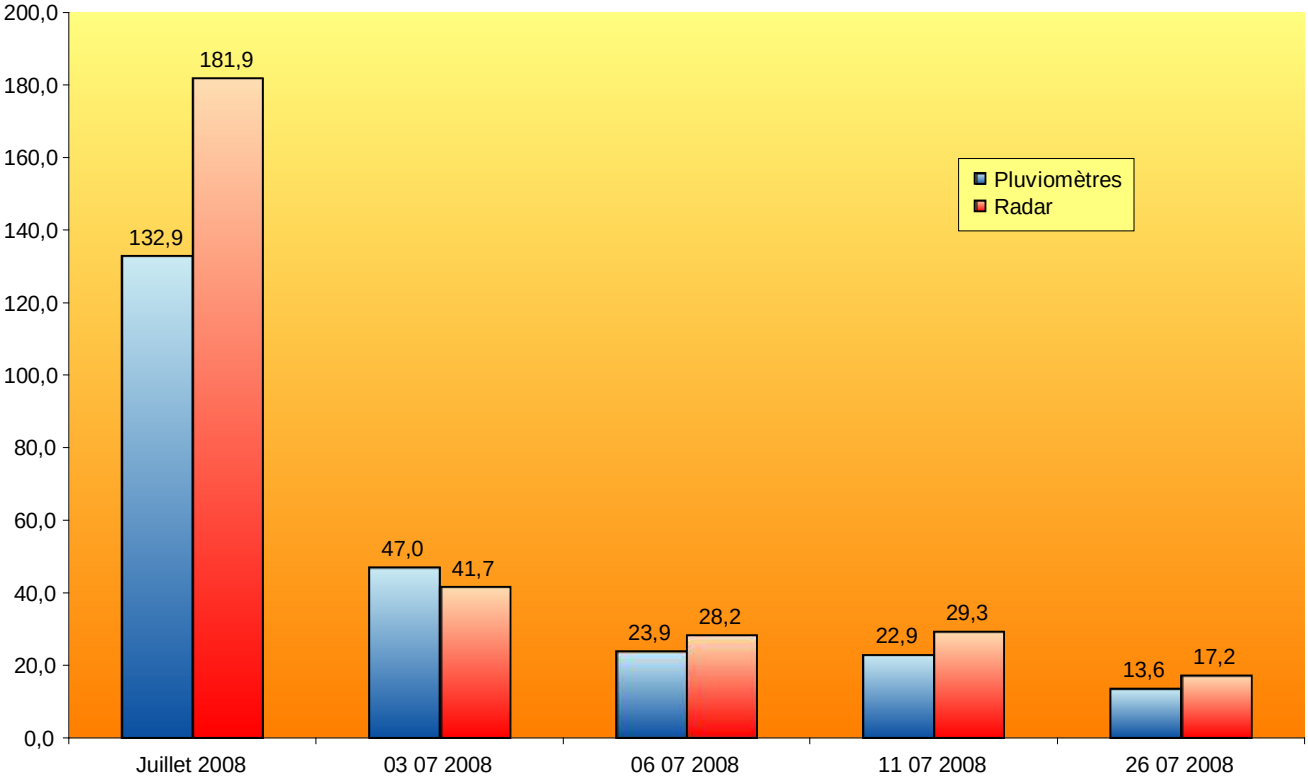


Figure 4.47 : Hauteurs d'eau cumulées (mm) du réseau de mesure au sol du Grand Lyon et des lames d'eau Panthere *: mois et épisodes pluvieux de juillet 2008*

4.3.2 Les résultats de la comparaison ponctuelle se révèlent performants

Seule l'analyse ponctuelle a été réalisée pour cet échantillon de données (l'analyse pseudo-ponctuelle n'a pas apporté d'informations significatives sur les données de la période précédente). Les écarts obtenus avec les lames d'eau *Panthere* entre estimations radars et mesures au sol sont bien moindres que ceux issus des données *Hydram* (tableau 4.21).

Cette amélioration des données et des traitements de la part de Météo-France est plus flagrante encore lorsque l'on prend en compte le caractère remarquablement intense des épisodes en question, avec des intensités qui oscillent autour des 100 mm/h en 18 minutes. Les écarts relatifs moyens tournent autour de 15 %, à l'exception de l'épisode pluvieux du 11 juillet 2008. Cet épisode très intense, avec 22, 4 mm en 18 minutes recensés à Saint-Fons, a

été caractérisé par la chute de grêlons d'une taille avoisinant les trois centimètres (Gallet, 2008). Or, nous avons vu dans les chapitres précédents les biais de mesure provoqués par la chute de grêle, au niveau du radar avec le phénomène de bande brillante ou avec les pluviomètres, notamment avec ceux à augets basculeurs. Ainsi, les résultats de mesure concernant la journée du 11 juillet 2008 ne sont pas considérés comme représentatifs.

En faisant abstraction de cette journée non représentative, nous obtenons une erreur relative moyenne de 13, 6 % pour les épisodes intenses de ce mois-ci. Cette erreur moyenne de 13,6 % est à rapprocher de celle de 37,6 %, obtenue avec le même type d'épisode pour les lames d'eau *Hydram*. Les traitements supplémentaires récents de Météo-France décrits dans les paragraphes précédents participent donc activement à l'amélioration de la qualité de mesure hydrologique du radar de Saint-Nizier.

Ecart relatif moyen (%)	Juillet	03/07/2008	06/07/2008	11/07/2008	26/07/2008
	15,6	15,1	17,6	33,8	8

Tableau 4.21 : Ecart relatif moyen (%) entre les estimations des lames d'eau radars et les mesures au sol

Cependant, un autre problème se pose maintenant. Nous avons vu que certains pixels ont été filtrés à cause de leur fiabilité moindre. Même s'il n'en subsistait qu'un seul sur le mont Verdun pour les lames d'eau *Panthere*, les pixels à filtrer étaient plus nombreux sur les lames d'eau *Hydram*, notamment dans la plaine de l'est lyonnais. La partie suivante va tenter de proposer des solutions pour remédier à ces manques d'information et ainsi offrir une couverture complète de données sur le territoire du Grand Lyon.

5. Le recours à l'interpolation spatiale pour une couverture complète de données

Nous avons constaté que le filtrage de pixels de moindre qualité liés aux échos fixes laissait des espaces vides dans la couverture hydrologique du radar sur le Grand Lyon, notamment sur les lames d'eau *Hydram*. Or, il est bien souvent nécessaire d'avoir à disposition une donnée continue sur l'ensemble du territoire à étudier. Ainsi, l'interpolation spatiale permet de proposer une couverture complète à partir de données ponctuelles (cf.

chapitre précédent). Cette fois-ci et contrairement au précédent chapitre, l'interpolation ne reposera plus sur les données du réseau de mesure au sol, mais sur les valeurs du radar (le pixel carré de un kilomètre de côté est alors résumé à son point central). La technique du krigeage peut ainsi être employé dans ce but. Cependant, il existe une technique d'interpolation qui permet d'associer à la fois les données issues du radar et celles issues de réseau de pluviomètres. Il s'agit de la technique du cokrigeage. Le cokrigeage offre la possibilité de prévoir la variable d'intérêt par une combinaison linéaire pondérée de ses observations, mais aussi des observations des variables auxiliaires (Baillargeon, 2005 ; Arnaud et Emery, 2000 ; Delrieu, 2003). Dans ce cas, la variable d'intérêt est la donnée radar, et la variable secondaire auxiliaire est la donnée pluviométrique au sol (fig. 4.48). Ces deux techniques d'interpolation vont maintenant être testées et évaluées par validation croisée.

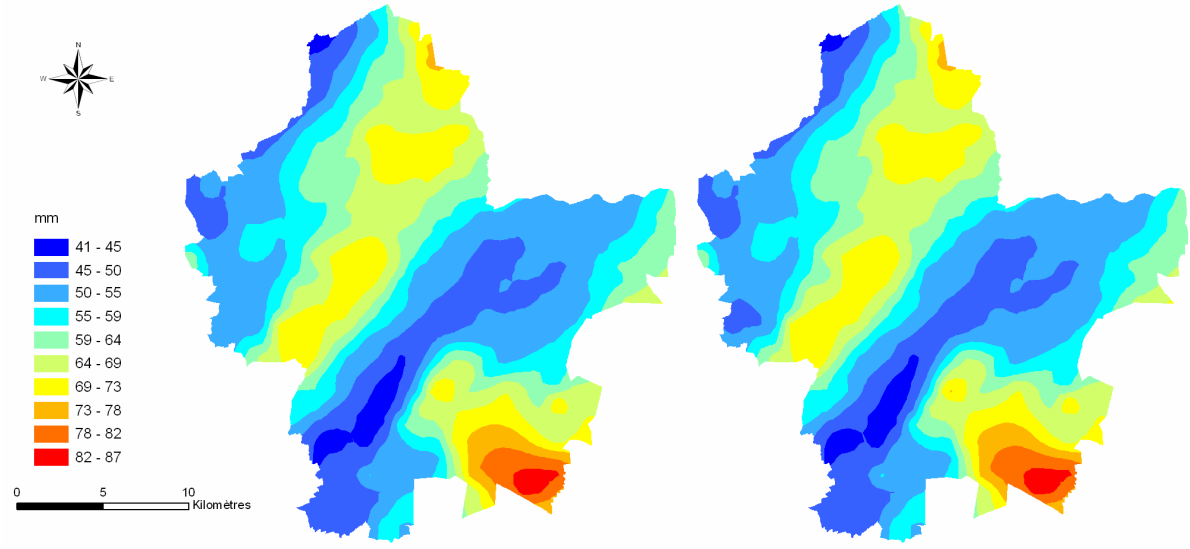


Figure 4.48 : Interpolation spatiale des hauteurs d'eau de l'épisode du 1er mai 2002 par krigeage ordinaire (à gauche) et par cokrigeage ordinaire (à droite). Ces cumuls sont à rapprocher de ceux de la figure 4.42 issus des données radars filtrées. La différence entre l'interpolation par krigeage et cokrigeage est minime.

5.1 La validation croisée pour comparer le krigeage au cokrigeage

D'emblée, une première analyse visuelle nous indique que les différences d'interpolation entre krigeage et cokrigeage sont mineures (fig. 4.46), et ne se révèlent en

général qu'avec un zoom très fin sur les isohyètes de chacun des cumuls (les différences à l'échelle globale sont infimes).

Tous les cumuls des lames d'eau des 17 épisodes de l'échantillon de pluie de la période 2001-2006 ont été interpolés par krigeage et par cokrigeage. Leur efficacité d'estimation a été évaluée par validation croisée (cf. chapitre précédent). Les écarts moyens (fondés sur la distance rectilinéaire) entre valeur observée et valeur estimée ont été calculés pour chacun des 17 épisodes pour les deux méthodes d'interpolation. Les résultats de cette validation croisée se trouvent compilés dans le tableau 4.22.

Date	Krigeage	Cokrigeage	Episodes remarquables en termes :
09/09/2002	3,777	3,782	Intensité maximale 18 minutes
04/08/2004	3,137	3,011	
23/07/2004	1,938	1,925	
19/09/2002	1,807	1,804	
29/07/2005	1,473	1,450	
01/12/2003	2,427	2,420	Hauteur totale
15/04/2005	3,623	3,625	
23/11/2002	3,390	3,391	
14/07/2001	3,864	3,896	
01/05/2002	4,079	4,496	
25/10/2004	0,511	0,512	
17/08/2004	0,918	2,177	
13/03/2004	4,330	4,331	
07/04/2005	0,498	0,500	Durée
22/09/2001	2,106	2,106	
16/07/2002	2,396	2,458	
16/10/2002	3,948	3,940	

Tableau 4.22 : Distance rectilinéaire (mm) issue de la validation croisée, après interpolation par krigeage et cokrigeage, entre les valeurs observées et les valeurs estimées pour les 17 pluies de l'échantillon

La distance rectilinéaire moyenne pour le krigeage est de 2,6 mm, alors qu'elle est de 2,7 mm pour le cokrigeage. Outre les valeurs très faibles des écarts qui nous informent de la très grande qualité des interpolations dues au très grand nombre de points à interpoler, nous constatons à l'aide du tableau 4.21 que ces distances sont pratiquement similaires pour chaque événement. De plus, les distances moyennes ne montrent pas d'évolution significative en fonction du type d'épisode considéré. La distance moyenne est de 2,4 mm pour les épisodes remarquables en termes d'intensité, 2,9 mm pour ceux en termes de hauteur totale, et de 2,2 mm pour ceux en termes de durée. Enfin, l'utilisation de variables

supplémentaires telles que la mesure de la pluie par pluviomètres peut introduire des biais additionnels si, malgré toute la critique antérieure, ces valeurs s'avéraient erronées.

Ainsi, il ne semble pas nécessaire de recourir à une interpolation basée sur le cokrigeage des données radars et pluviométriques. Le krigeage ordinaire des valeurs radars uniquement (déjà remis à niveau au préalable par un coefficient de correction fondé sur les valeurs du réseau de mesure au sol du Grand Lyon) est largement satisfaisant, et plus rapide à mettre en œuvre. De plus, le cokrigeage à échelle temporelle fine se heurte à une difficulté de taille liée au pas de temps. Les données de lame d'eau radar sont accessibles toutes les quinze minutes (entre 2001 et mi-2006) ou toutes les cinq minutes (depuis mi-2006), alors que les données pluviométriques le sont toutes les six minutes. Il s'en suit une difficulté d'intégration temporelle de ces données qui ne permet pas de faire facilement un couplage de ces deux données différentes à un pas de temps fin.

Le krigeage des lames d'eau filtrées et remises à niveau semblent donc être opportun afin d'obtenir une quantification fine de la distribution spatiale des épisodes pluvieux. L'objet des paragraphes suivants est donc de manifester visuellement les améliorations apportées par le radar en confrontant les sorties des lames d'eau traitées avec l'interpolation des mesures au sol.

5.2 Confrontation visuelle des cumuls des hauteurs d'eau par pluviomètres et lames d'eau radar

L'observation radar apporte une précision indéniable par rapport aux mesures effectuées à partir du réseau de mesure au sol. Contrairement à une estimation fondée sur une trentaine de pluviomètres, le radar offre la possibilité de connaître la pluie sur chaque pixel carré d'un kilomètre de côté (à l'exception des zones touchées par des échos fixes et filtrées). Il en découle une amélioration considérable de la connaissance de la distribution spatiale des épisodes pluvieux. Même si les interpolations issues du réseau de mesure au sol très dense du Grand Lyon sont d'une bonne qualité (cf. chapitre précédent), elles ne peuvent rivaliser avec la mesure radar pour représenter la répartition spatiale de l'aléa pluvial. Il arrive que des noyaux pluvieux d'un diamètre de quelques kilomètres échappent au réseau de mesure au sol. En outre, l'amélioration de la connaissance de la distribution de la

pluie se vérifie sur tous les types d'épisodes remarquables, que ce soit en fonction de leur intensité (fig. 4.49 et 4.50), de leur hauteur totale d'eau précipitée (fig. 4.51 et 4.52) ou de leur durée (fig. 4.53). Ces cartes ont donc pour objectif d'illustrer visuellement les améliorations apportées par le radar en confrontant les sorties des lames d'eau traitées (carte située à gauche) avec l'interpolation des mesures au sol (située à droite).

- *Confrontation visuelle des cumuls issus des données au sol et du radar sur les épisodes remarquables en termes d'intensité :*

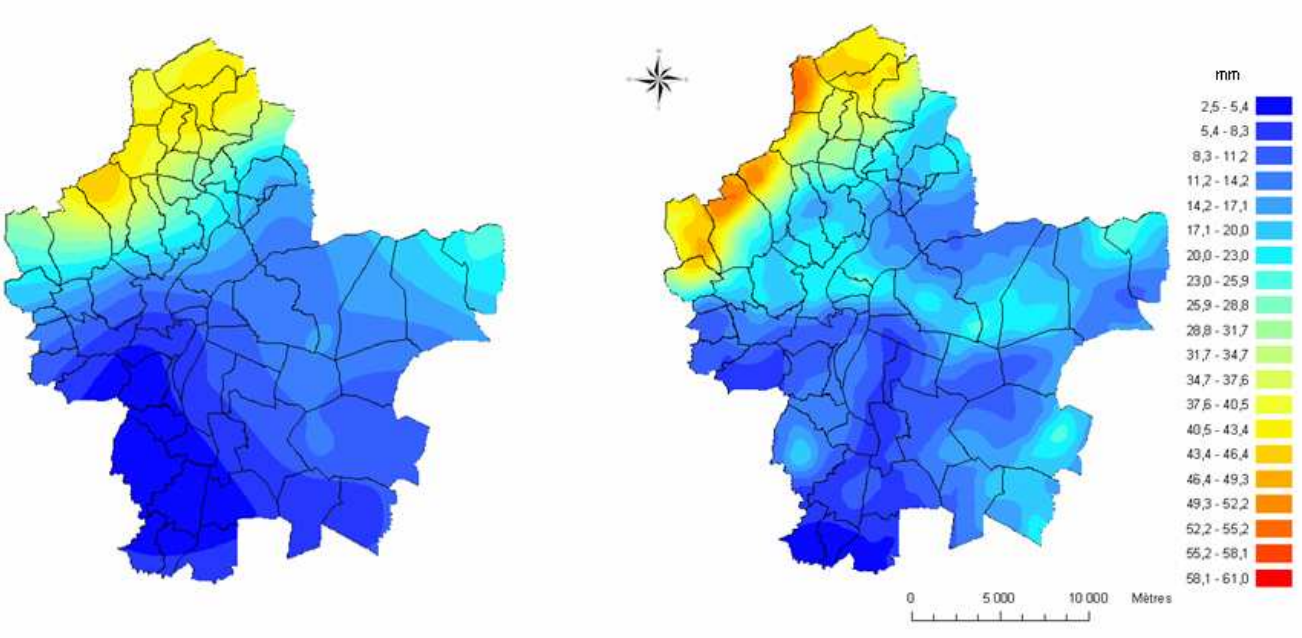


Figure 4.49 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 09 septembre 2002 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite)

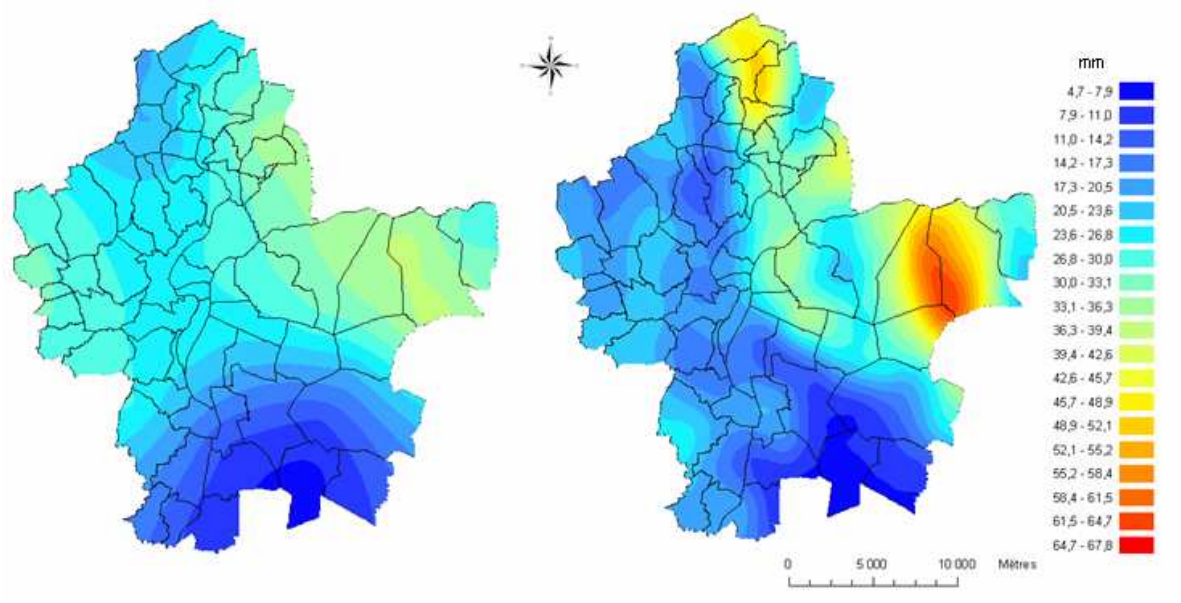


Figure 4.50 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 04 août 2004 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite)

- *Confrontation visuelle des cumuls issus des données au sol et du radar sur les épisodes remarquables en termes de hauteur totale d'eau précipitée :*

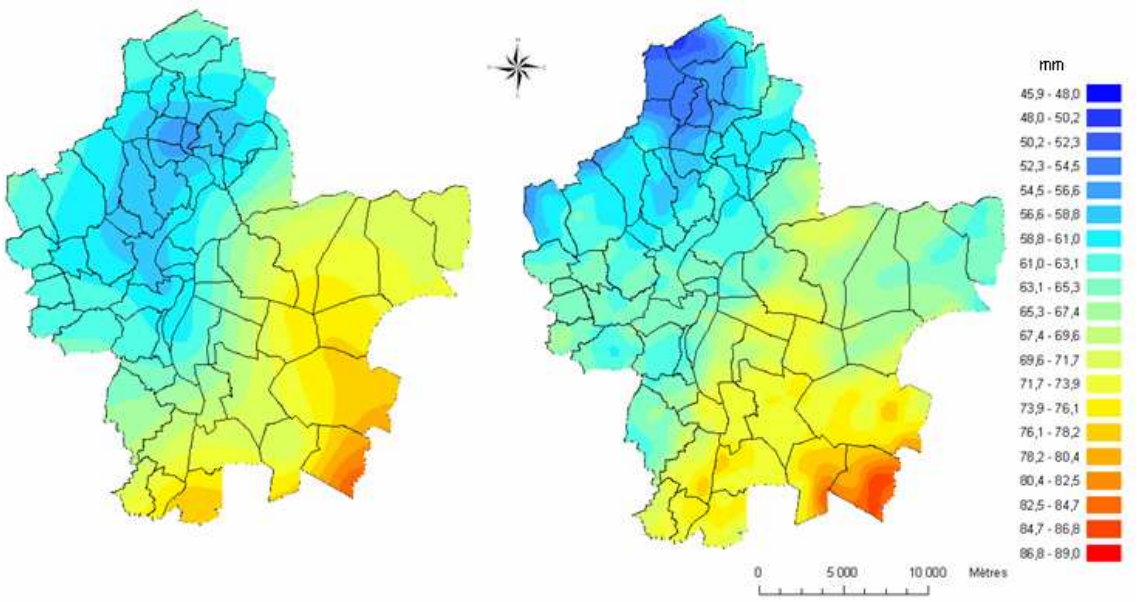


Figure 4.51 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 23 novembre 2002 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite)

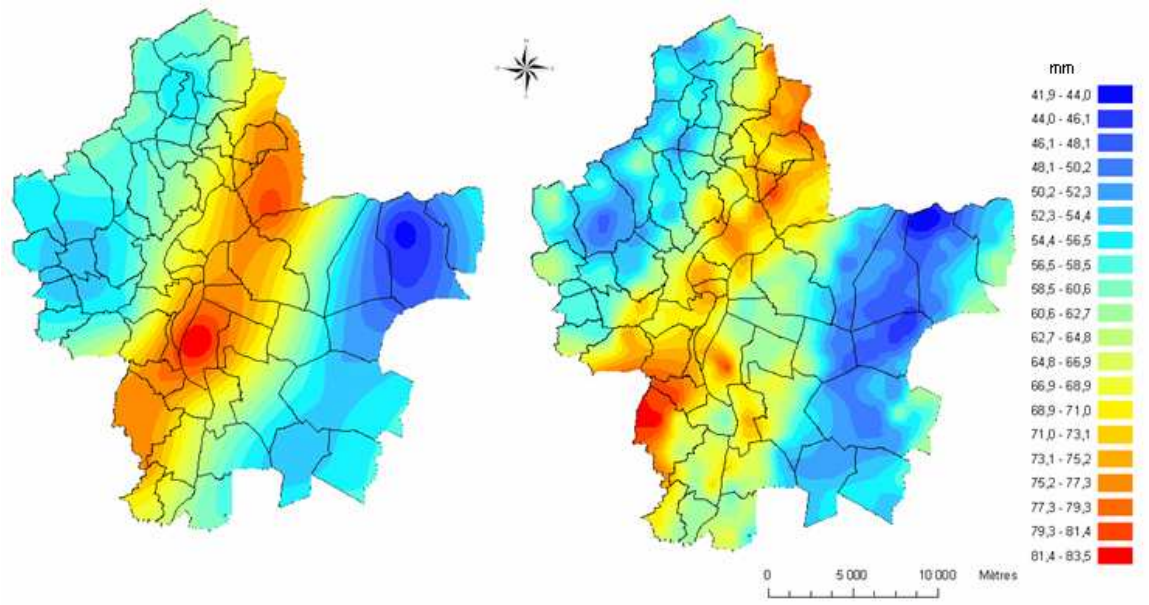


Figure 4.52 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 14 juillet 2001 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite)

- *Confrontation visuelle des cumuls issus des données au sol et du radar sur les épisodes remarquables en termes de durée :*

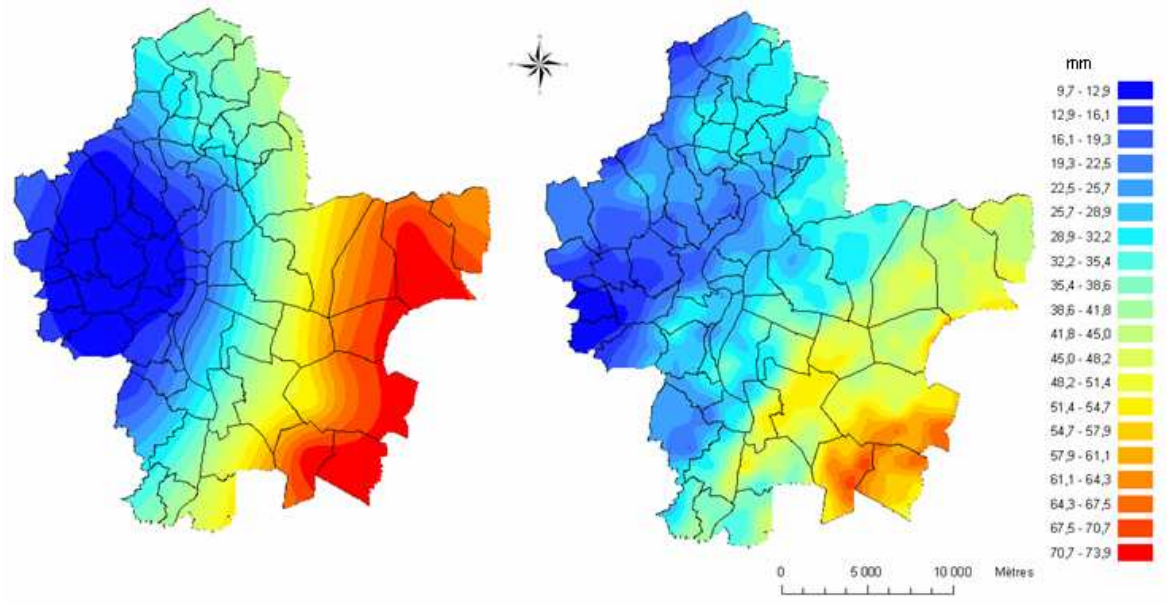


Figure 4.53 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 16 octobre 2002 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite)

Synthèse de la partie : une mesure radar dont la qualité a constamment progressé

Le radar météorologique est un outil performant qui vient compléter la mesure pluviométrique au sol. Cependant, il existe de nombreuses limites de la mesure par radar. Ces limites, le plus souvent liées au relief, sont à corriger à l'aide du réseau de mesure au sol, avant toute utilisation des données du radar dans un but hydrologique. De cette manière, ce chapitre s'est focalisé sur l'évaluation de la qualité de mesure du radar local de Lyon, sur le territoire de l'agglomération.

Jusqu'à 2001, le radar était installé sur le site de l'aéroport Saint-Exupéry (anciennement Satolas). Ce radar, situé dans la plaine à 250 mètres, rencontrait des difficultés pour quantifier les précipitations de manière précise. En effet, des échos fixes d'origines naturelles ou anthropiques venaient perturber la mesure, qui s'est avérée douteuse. En conséquence, Météo-France a déplacé ce radar sur le site de la commune de Saint-Nizier d'Azergues, à une quarantaine de kilomètres au nord-ouest de l'agglomération, sur une crête, à une altitude de 920 mètres. Les lames d'eau *Hydram* fournies jusqu'en 2006 étaient de bien meilleure qualité que les données produites sur le site de Saint-Exupéry. Cependant, l'appréciation de la pluie sur le territoire lyonnais souffrait encore de nombreux échos fixes. Ces échos étaient situés sur les secteurs de relief de l'agglomération, les Monts d'Or et le plateau de Fourvière. On en recensait aussi, d'une manière assez surprenante, en secteur de plaine, au sud-est de l'agglomération. Il est donc nécessaire de filtrer ces échos avant une utilisation hydrologique de calcul de débit ou de volume d'eau dans le réseau d'assainissement (Renard et al., 2009).

La dernière génération de lames d'eau (*Panthere*), comporte de nombreuses améliorations technologiques visant à améliorer cette qualité de mesure. En conséquence, la plupart des problèmes d'échos fixes ont été résolus grâce à une élévation du faisceau radar, contrairement à la précédente génération de lames d'eau qui avait un angle de site fixe. Il ne subsiste plus qu'un seul pixel de qualité douteuse sur le plus haut sommet des Monts d'Or.

Des comparaisons globales, puis ponctuelles, entre pluviomètres et pixels radars, ont été menées afin d'apprécier de manière concrète la fiabilité de ces dernières données. Il ressort de ces études la qualité correcte des lames d'eau *Hydram*, et la bonne fiabilité des lames d'eau *Panthere*, notamment au niveau des épisodes pluvieux d'une intensité remarquable (Renard et Comby, 2010a).

Cependant, le filtrage des zones de qualité de mesure moindre laisse des espaces vides dans la couverture du territoire du Grand Lyon. C'est pourquoi nous avons proposé deux techniques d'interpolation spatiale afin d'obtenir une couverture complète de données sur l'ensemble de la couverture radar. Ces méthodes d'interpolation, le krigeage et le cokrigeage, donnent toutes deux des résultats très satisfaisants et comparables. Ainsi, la technique de krigeage a été préférée, pour des raisons de commodité de mise en œuvre et de rapidité.

Les résultats des études fondées sur le réseau de mesure au sol ont mis en évidence que les épisodes pluvieux remarquables adoptaient des déploiements préférentiels. Nous avons en outre montré qu'il était possible d'identifier et de mettre en évidence le déplacement de noyaux de pluie de forte intensité, uniquement à l'aide d'un réseau dense de pluviomètres, tel que celui du Grand Lyon. En effet, la majorité de ces noyaux de pluie de forte intensité adoptent une trajectoire du sud-ouest au nord-est, avec une orientation de 45°N environ. Le radar météorologique va être utilisé dans la prochaine partie dans le but de compléter et de valider ces premiers résultats révélés à l'aide de ce réseau de mesure au sol. Cette étude va permettre de préciser la situation climatique locale, et plus précisément la dynamique des événements pluvieux lyonnais.

Partie 2 :

Le radar météorologique permet une étude fine de la dynamique descriptive de l'aléa pluvial

---

Les résultats de l'utilisation du réseau de mesure au sol, et plus particulièrement l'étude variographique, nous ont révélé la présence de « déploiements préférentiels » (Arnaud et Emery, 2000) dans les hauteurs d'eau cumulées des épisodes remarquables. Ces déploiements présentaient une orientation de 45°N environ. Cette variographie a été complétée par une étude des interpolations spatiales de ces épisodes à une échelle temporelle très fine. En effet, des noyaux de forte intensité ont clairement été mis en évidence pour des pas de temps d'étude de six minutes. En outre, il a été possible de suivre ces noyaux sur plusieurs pas de temps successifs, et ainsi d'en obtenir des informations portant sur leur direction. Ces résultats de l'étude de l'aléa par spatialisation à pas de temps fin ont permis de vérifier et de conforter ceux issus de l'étude variographique.

Dans la continuité de ces études antérieures qui reposent sur l'utilisation du réseau de mesure au sol, cette partie se fonde sur un outil complémentaire : le radar météorologique local lyonnais. Les évaluations précédentes ont statué sur la qualité de mesure hydrologique de ce radar. En conséquence, ce dernier va être utilisé dans le but d'acquérir des informations sur les noyaux de pluie intense déjà mis en évidence, afin de valider ou d'infirmer les premiers résultats. Ainsi, cette étude vise à répondre à un triple questionnement. Fondamental dans un premier temps, car cette étude participe à l'amélioration de la caractérisation de l'aléa pluvial. Méthodologique ensuite, en apportant des réponses pratiques avec l'utilisation presque exclusive d'un SIG. Opérationnel enfin, car les résultats pourront servir de base pour la mise en place d'un futur système d'anticipation et de prévision de situations pluvieuses jugées « à risque » pour la communauté urbaine de

Lyon, et apporter des informations pertinentes sur les intensités maximales, les trajectoires, ou encore les vitesses des noyaux de pluie intense.

1. Un suivi des caractéristiques des noyaux de pluie intense par SIG

Le radar météorologique local de Lyon est un outil dont la fiabilité de mesure hydrologique a été testée et validée (cf. partie précédente). Il va maintenant être utilisé afin d'obtenir des informations complémentaires sur les noyaux de pluie de forte intensité déjà mis en évidence, en vue de l'amélioration de la caractérisation de l'aléa pluvial du Grand Lyon.

Les premières tentatives informatisées de ce genre datent des années 70, avec l'algorithme WSR-88D storm series (Wilk et Gray, 1970) ou HIPLEX (Brady et al., 1978), bien que la première étude empirique publiée sur le sujet le fut en 1888 (Chang et al., 2002 - fig. 5.1). Cependant, ces premières tentatives ne furent pas vraiment concluantes, en raison des limites technologiques du matériel informatique et de la mesure radar. Néanmoins, Wilk et Gray (1970) posèrent les bases méthodologiques du suivi des noyaux de forte intensité pluvieuse. En effet, le WSR-88D storm series algorithm appliquait déjà une méthode d'identification des centroïdes des noyaux de pluie au signal radar « dans le but d'estimer le déplacement des orages » (Forsyth, 1979). Leur technique en 2D de détermination des centroïdes d'orages identifiait les aires contiguës d'échos radars au-dessus d'un seuil donné de réflectivité. « Un centroïde pondéré par l'intensité, utilisé pour définir la localisation de l'orage, était déterminé pour chacune des aires identifiées » (Johnsson et al. 1998).

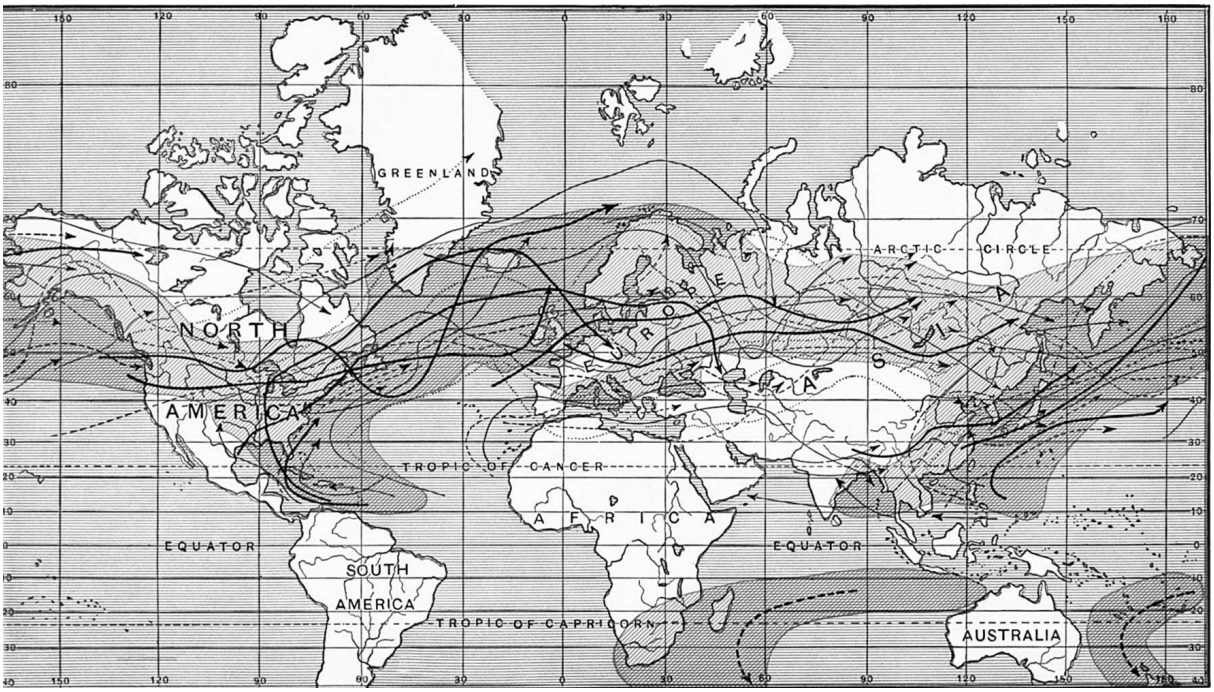


Figure 5.1 : Représentation de la fréquence et de la distribution des orages au milieu du 19ème siècle (source : Hinman, 1888).

Les algorithmes développés dans les années 90 suivent ce même principe. On y retrouve notamment les algorithmes TITAN de Dixon et Wiener (1993), et SCIT de Johnson et al. (1998). Ces algorithmes reposent sur les mêmes principes que le WSR-88D storm series de Wik et Gray (1970), c'est-à-dire la « définition d'une cellule d'orage comme une région contiguë de forte valeur de réflectivité qui dépassent un certain seuil minimal » (Handwerker, 2002). La méthodologie diffère cependant d'une méthode à l'autre. « L'algorithme SCIT utilise différents seuils distincts de réflectivité pour définir les objets, et pour chacune des élévations les objets sont réduits à leur région les plus intenses » (Handwerker, 2002). Toujours d'après Handwerker (2002), cette méthode intéressante n'est pas la plus efficace en raison de la multiplicité des seuils, c'est pourquoi « TITAN applique un seul seuil qui est choisi par l'utilisateur ».

Plus récemment, en 2002, un algorithme appelé TRACE 3D a été produit. Cet algorithme adopte les mêmes bases méthodologiques que les précédents. Il identifie les « cellules convectives et les suit dans le temps et l'espace en utilisant exclusivement la réflectivité radar en entrée. L'identification des cellules est réalisée en assemblant les régions contiguës qui surpassent un certain seuil de réflectivité » (Handwerker, 2002). Ensuite, les centroïdes de ces amas de forte réflectivité sont calculés et utilisés comme référent pour le suivi de ces cellules (Lakshmanan et al., 2003 ; Sénési, 2002). Les derniers

algorithmes Swiss TRT (Hering et al., 2005), Celltrack (Kyznarova et Novak, 2009) ou encore Cotrec (Novak et al., 2009) suivent aussi les mêmes principes.

Le terme « cellule » de pluie intense est l'appellation la plus fréquemment rencontrée dans la bibliographie scientifique de référence, francophone comme internationale (par exemple dans Faure et al., 2005a ; Lakshmanan, 2001 ; Stalker et Knupp, 2002 ; Brémaud et Pointin, 1993). Il est même aussi très souvent directement employé le terme de « cellule orageuse » (par exemple dans Lakshmanan et Smith, 2009 ; Johnson et al., 1998 ; Bengtsson et Hodges ; 2006 ; Lo Conti et al., 2009 ; Horvath et al., 2009 ; Berdon, 2009 ; Lakshmanan et al., 2009) ou de « cellule convective » (Rosenfeld, 1987 ; Lakshmanan et al., 2000 ; Klazura et Imy, 1993 ; Sokol, 2009). Ces appellations peuvent parfois poser certaines interrogations (notamment chez les géographes climatologues français), car ces amas de forte réflectivité en deux dimensions peuvent ne pas constituer de véritables « cellules » à caractère orageux ou convectif, telles que définies notamment par Austin et Houze (1972), Ramos-Domingues (2003 et 2004), Chancibault (2002), Weissman et Klemp (1984), Berdon (2009), ou encore Ivanov et Palamarchuk (2010).

Ainsi, il est très rarement rencontré dans la bibliographie de réflexion à ce sujet. Handwerker (2002), préfère dénommer les aires contiguës de forte intensité identifiées des « objets distincts » (« discrete objects »), ou des « noyaux de réflectivité » (« reflectivity core »), notamment pour exprimer les résultats d'identification de son algorithme TRACE3D. Ce dernier utilise aussi parfois le terme « régions de précipitation intense » (« regions of intense precipitation »).

Lakshmanan et al. (2003) mettent des guillemets à « cellule » pour désigner la première fois les sorties de leur algorithme d'identification des orages (« storm « cells » »), et expliquent qu'il s'agit d'« éléments de petites tailles » (« small-scale features »). Ainsi, pour éviter toute complication inutile liée à l'étymologie, nous désignerons dans la suite de ce texte toutes « régions » contiguës d'une intensité pluvieuse ou d'une réflectivité élevée par le terme « noyau de forte intensité ». Cependant, ce terme est très mal perçu et très mal compris par les professionnels de l'hydrologie urbaine qui lui préfèrent le vocable « cellule ».

1.1 Sélection des événements et identification des noyaux de pluie de forte intensité

1.1.1 Sélection des épisodes pluvieux et détermination de leur durée d'étude

Nous avons à notre disposition sous forme de données radars l'ensemble des épisodes remarquables de la période 2001-2005 (comme définis dans les chapitres précédents). Cependant, cette étude va se restreindre à l'analyse des épisodes pluvieux qui présentent les intensités les plus remarquables, car il sont à l'origine de la majorité des nuisances subies. Ainsi, seuls les épisodes remarquablement intenses de la période 2001-2005 vont être analysés, c'est-à-dire les épisodes des 9 et 22 septembre 2002, du 23 juillet 2004, du 4 août 2004 et du 29 juillet 2005.

Sur le territoire du Grand Lyon, la durée des épisodes pluvieux est déterminée d'après les précipitations enregistrées par les pluviomètres de la communauté urbaine, selon les critères décrits dans les chapitres précédents. Cependant, afin d'obtenir une vue d'ensemble du phénomène pluvieux, nous avons choisi de ne pas nous limiter à la période de temps déterminée par ces pluviomètres. Ainsi, nous prenons en compte les trois heures qui ont précédés le début de la pluie, ainsi que l'heure suivant son arrêt sur le territoire du Grand Lyon.

1.1.2 Une analyse de sensibilité pour l'identification des noyaux de forte intensité

1.1.2.1 La nécessité de sélectionner un seuil d'intensité

Une image radar à un pas de temps donné est constituée d'une multitude de valeurs de réflectivité ou d'intensité, des plus faibles comme aux plus élevées (fig. 5.2). Or, il est nécessaire de se concentrer sur les zones de forte intensité uniquement. Ainsi, l'identification

de ces noyaux passe par la sélection de régions contiguës qui surpassent un certain seuil d'intensité ou de réflectivité. Il ressort d'une étude bibliographique à ce sujet que les seuils utilisés d'une étude à l'autre diffèrent, allant de 30 dBZ à 60 dBZ en général, soit de 10 mm/h à 200 mm/h environ (Wilk and Grey, 1970 ; Handwerker, 2002 ; Johnson et al., 1998 ou Lakshmanan et Smith, 2010, par exemple). Ils peuvent aussi être encore choisis par l'utilisateur en fonction de son expérience et de ses objectifs (notamment Dixon et Wiener, 1993 ; Novak, 2007 ; Kyznarova et Novak, 2009).

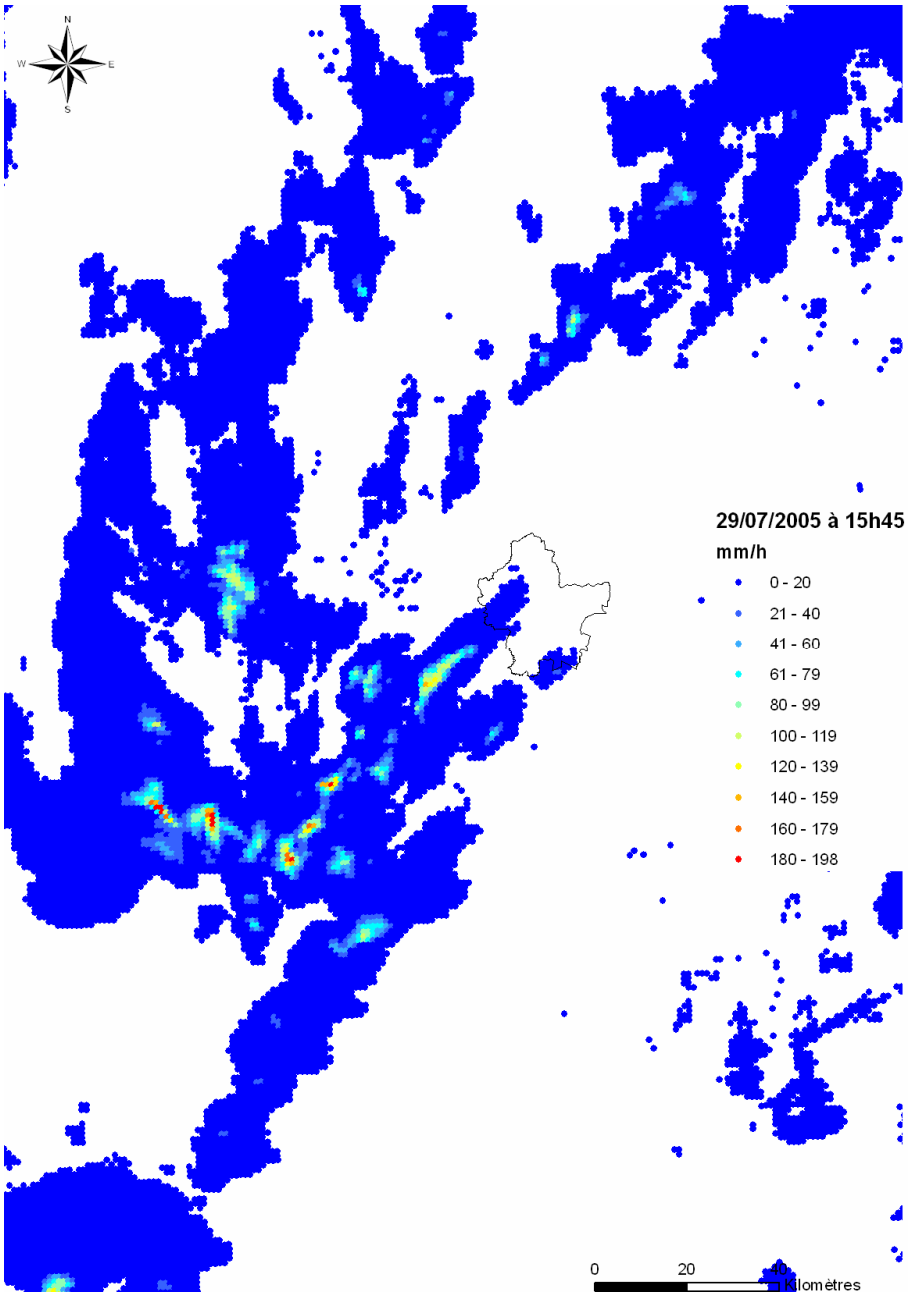


Figure 5.2 : Intensité de pluie (mm/h) le 29 juillet 2005 à 15h45 (données : réflectivité radar convertie en intensité de pluie suivant Marshall-Palmer 1948)

Il est donc nécessaire de définir à notre tour un seuil d'intensité qui corresponde précisément au radar météorologique de Saint-Nizier d'Azergues pour les cinq épisodes pluvieux de notre échantillon d'étude. Cette étude se fonde sur l'utilisation de données de réflectivité converties en intensité de pluie à l'aide de la formule de Marshall-Palmer, 1948. Ces données sont remises à niveau à l'aide des coefficients correcteurs calculés précédemment avec le réseau de mesure au sol du Grand Lyon. En effet, dans ce cas précis, les lames d'eau *Hydram* ne sont pas exploitables car elles ne sont accessibles que toutes les quinze minutes, ce qui se révèle insuffisant pour une étude spatiale fine des noyaux de forte intensité (cf. partie précédente). Cette définition de seuil va donc se fonder sur une étude de sensibilité qui appliquera différents filtres d'intensité sur un même pas de temps.

1.1.2.2 Une analyse de sensibilité par filtre d'intensité

Cette analyse de sensibilité porte sur deux pas de temps différents sur chacun des épisodes sélectionnés (tableau 5.1). Ces pas de temps ont été sélectionnés car ils présentent de nombreux noyaux avec de fortes intensités.

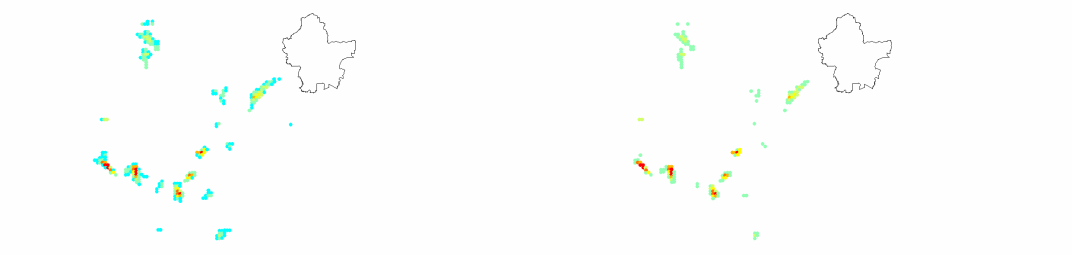
Episodes	Pas de temps analysés
09/09/02	15h10-15h15 et 16h20-16h25
19/09/02	13h05-13h10 et 16h40-16h45
23/07/04	05h30-05h35 et 05h45-05h50
04/08/04	15h30-15h35 et 15h55-16h00
29/07/05	10h30-10h35 et 15h45-15h50

Tableau 5.1 : Pas de temps retenus pour l'analyse de sensibilité

À chacun de ces pas de temps sont appliqués des filtres d'intensité. Ces filtres d'une valeur d'intensité donnée suppriment les intensités inférieures à cette valeur et ne laissent subsister que les intensités supérieures. Ainsi, dix filtres d'intensité sont utilisés : de 10 mm/h à 100 mm/h par pas de 10 mm/h (soient 10 mm/h, 20 mm/h, 30 mm/h, 40 mm/h, 50 mm/h, 60 mm/h, 70 mm/h, 80 mm/h, 90 mm/h et 100 mm/h). Un exemple de ces filtres est donné en figure 5.3 pour l'épisode du 29 juillet 2005 à 15h45, avec des filtres à 20 mm/h ; 40 mm/h ; 60 mm/h ; 80 mm/h et 100 mm/h.

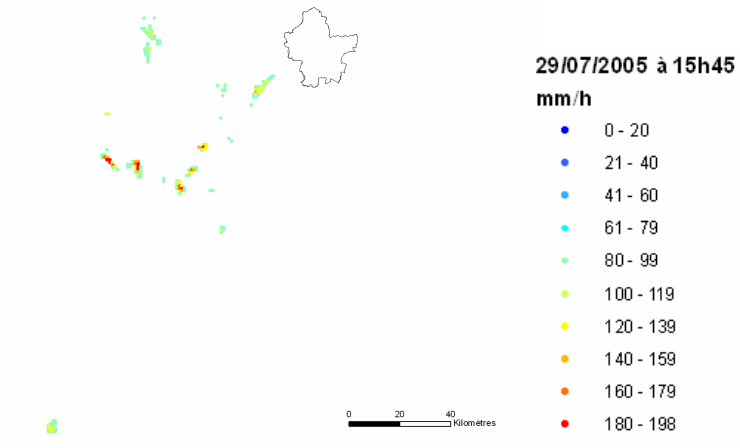
Filtre d’intensité de 20 mm/h

Filtre d’intensité de 40 mm/h



Filtre d’intensité de 60 mm/h

Filtre d’intensité de 80 mm/h



Filtre d’intensité de 100 mm/h

Figure 5.3 : Intensité de pluie (mm/h) à 15h45 le 29 juillet 2005, avec application de différents filtres d’intensité. De gauche à droite et de haut en bas ont respectivement été appliqués aux cinq cartes des filtres d’intensité de 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h, 80 mm/h et 100 mm/h (légende et échelle identiques pour les cinq cartes)

1.1.2.3 Résultats de l'analyse et sélection d'un filtre d'intensité

Lors de l'analyse de sensibilité, trois facteurs ont été étudiés en fonction du filtre d'intensité :

- *Le nombre de noyaux pluvieux de forte intensité présents dans la zone de couverture du radar. Le noyau de forte intensité est donc défini comme une région contiguë d'intensité supérieure au seuil fixé.*
- *L'intensité moyenne des noyaux de forte intensité (en mm/h)*
- *La superficie des noyaux de forte intensité (en km²)*

Les résultats se sont montrés similaires quel que soit le pas de temps ou l'épisode considéré.

Dans un premier temps, au niveau du nombre de noyau de forte intensité, nous obtenons une diminution de ces noyaux avec l'augmentation du niveau du filtre. Ce résultat n'est pas surprenant, les noyaux constitués de faibles valeurs d'intensité ne se retrouvent pas lors de l'application de filtres de plus forte intensité. Un exemple représentatif en est donné en figure 5.4, pour le 29 juillet 2005 à 10h30.

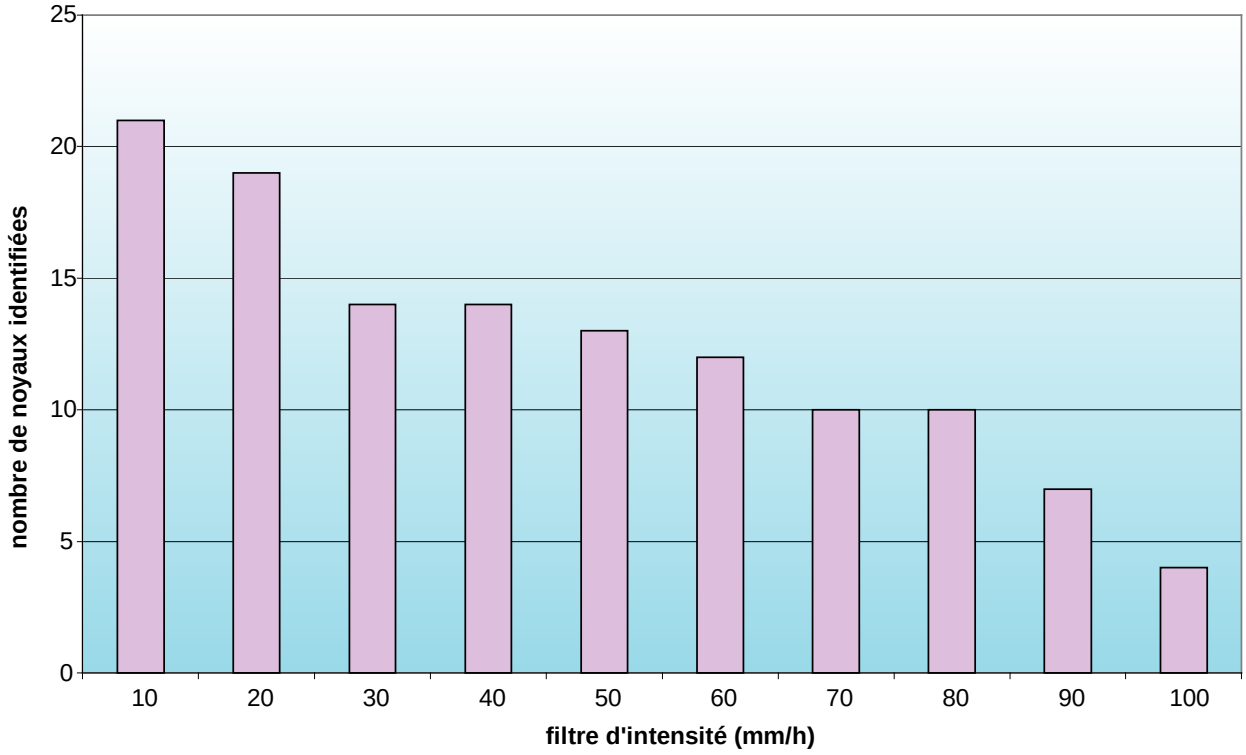


Figure 5.4 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 à 10h30 en fonction du filtre d'intensité appliqué

Dans un second temps, nous observons une augmentation de la moyenne par pas de temps de l'intensité moyenne des noyaux de forte intensité en fonction du filtre. Ce résultat s'explique par le fait que pour chaque élévation du filtre, les intensités les plus faibles sont éliminées, ce qui entraîne une augmentation de l'intensité moyenne des noyaux présents dans la couverture du radar. Un exemple représentatif en est donné en figure 5.5, pour le 29 juillet 2005 à 10h30.

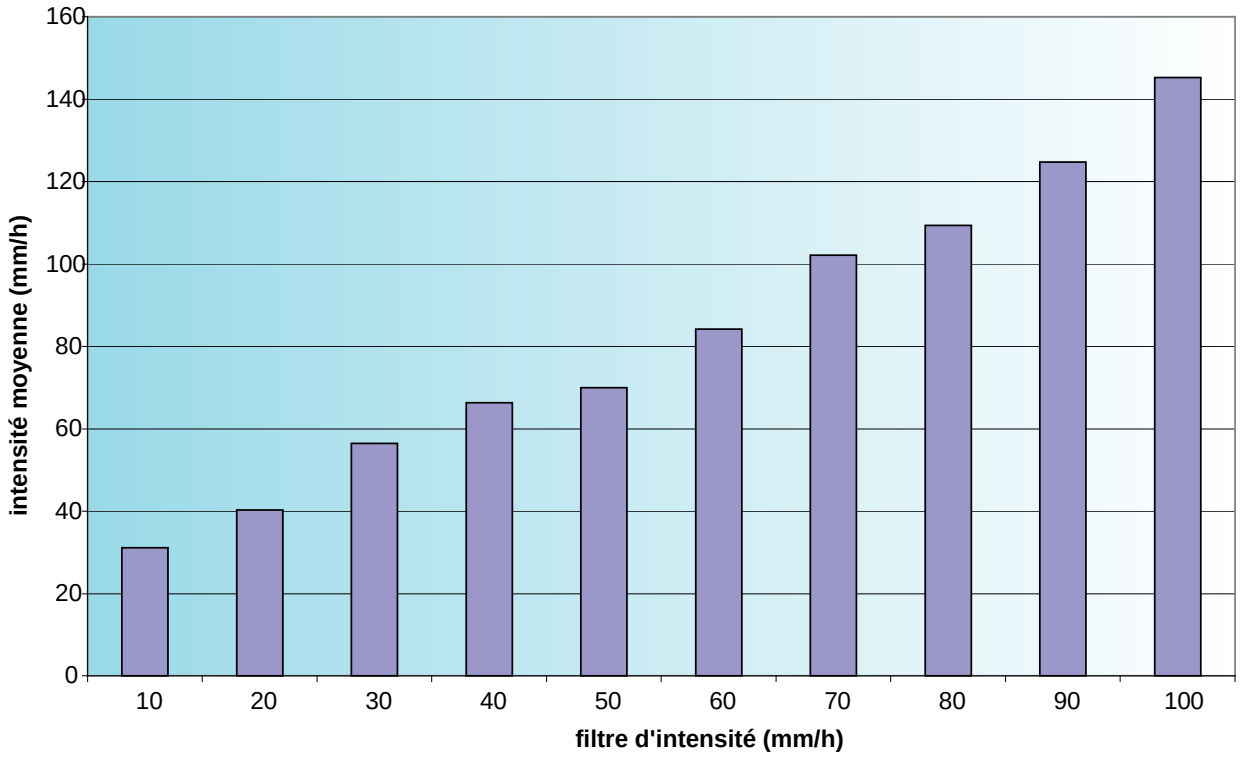


Figure 5.5 : Moyenne par filtres d'intensité dans la couverture radar des intensités moyennes de noyaux de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 à 10h30

Enfin, l'aire des noyaux de forte intensité diminue avec le filtre d'intensité, sans surprise. Cela s'explique encore par les mêmes raisons que précédemment. Un noyau de forte intensité est constitué d'un ensemble de pixels d'intensités diverses : plus le filtre appliqué est élevé, plus il ne subsistera que les pixels de plus forte intensité. Un exemple représentatif en est donné en figure 5.6, pour le 29 juillet 2005 à 10h30.

Pour résumer les résultats de l'analyse de sensibilité, plus les filtres d'intensité sont élevés, moins les noyaux de forte intensité sont nombreux dans la couverture du radar, plus leur intensité moyenne est forte et plus leur superficie est réduite. Ces résultats sont en accord avec les études antérieures sur le sujet (Handwerker, 2002 ; Johnson et al., 1998, notamment).

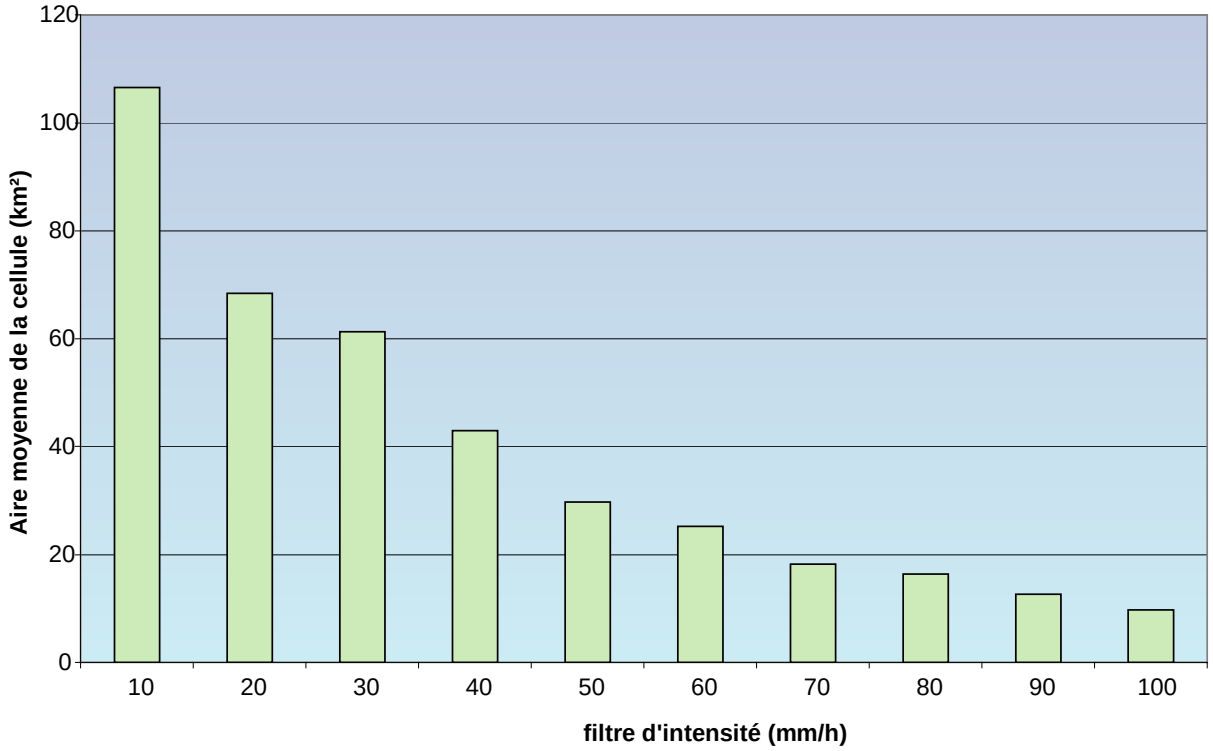


Figure 5.6 : Aires moyennes par filtres d'intensité des noyaux de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 à 10h30

Nous avons donc choisi d'utiliser ici pour cette étude, dans le cadre de ces données de réflectivité de ces cinq épisodes précis, un seuil de filtre d'intensité fixé à 60 mm/h. Ce choix a été effectué à l'aide des résultats de l'analyse de sensibilité, afin de se concentrer uniquement sur les noyaux d'intensité élevée, et d'éviter de surcharger inutilement l'échantillon d'étude et d'avoir à traiter un trop grand nombre d'éléments. Un noyau de forte intensité pluvieuse sera donc défini ici dans cette étude comme une région contiguë d'intensité supérieure à 60 mm/h.

Cependant, il convient de remarquer que si ce seuil d'intensité joue sur le nombre de noyaux, leur intensité moyenne et leur superficie, il n'influe en rien sur les paramètres d'études de première importance qui sont l'intensité maximale, la vitesse et la trajectoire de ces éléments pluvieux. La détermination de ces caractéristiques par le biais de traitements de statistiques spatiales de mesure de distribution géographique par SIG est l'objet des prochains paragraphes.

1.2 Des statistiques spatiales pour suivre les caractéristiques des noyaux de forte intensité

La méthodologie mise en place pour étudier les caractéristiques des noyaux de forte intensité, notamment leurs distributions et leurs tendances spatiales, permet de faire ressortir huit paramètres principaux qui figurent ci-dessous :

- *Intensité moyenne (mm/h)*
- *Intensité maximale (mm/h)*
- *Superficie (km²)*
- *Forme*
- *Rotation (°N)*
- *Orientation (°N)*
- *Variance circulaire*
- *Longueur (m) ~ Vitesse (km/h)*

Les intensités moyennes et maximales, la superficie, la forme et la rotation des noyaux de forte intensité vont être étudiés à l'aide de statistiques spatiales, et plus précisément en recourant aux notions de centre moyen pondéré et d'ellipse directionnelle. Les paramètres constitutifs des trajectoires des noyaux de forte intensité seront, quant à eux, déterminés en créant les vecteurs de déplacements des amas de pluie intense.

1.2.1 Le centre moyen pondéré pour l'étude de l'intensité et de la superficie

Une fois les noyaux de forte intensité identifiés et sélectionnés, la caractérisation de ces derniers est l'objet de cette étape, où les intensités moyennes et maximales et la superficie sont établies à son issue. En outre, nous allons recourir au principe du centre moyen pondéré afin de caractériser ponctuellement le noyau de forte intensité. Ce procédé nous servira par la suite lors de l'étude des trajectoires des noyaux à l'aide des vecteurs de déplacement.

Pour rappel, Météo-France fournit les coordonnées du coin haut – gauche des pixels radars de 1km². Les données que nous utiliserons ici seront rectifiées de + 500 mètres en abscisse et de - 500 m en ordonnées afin d'obtenir les coordonnées des centres des pixels (fig. 5.7).

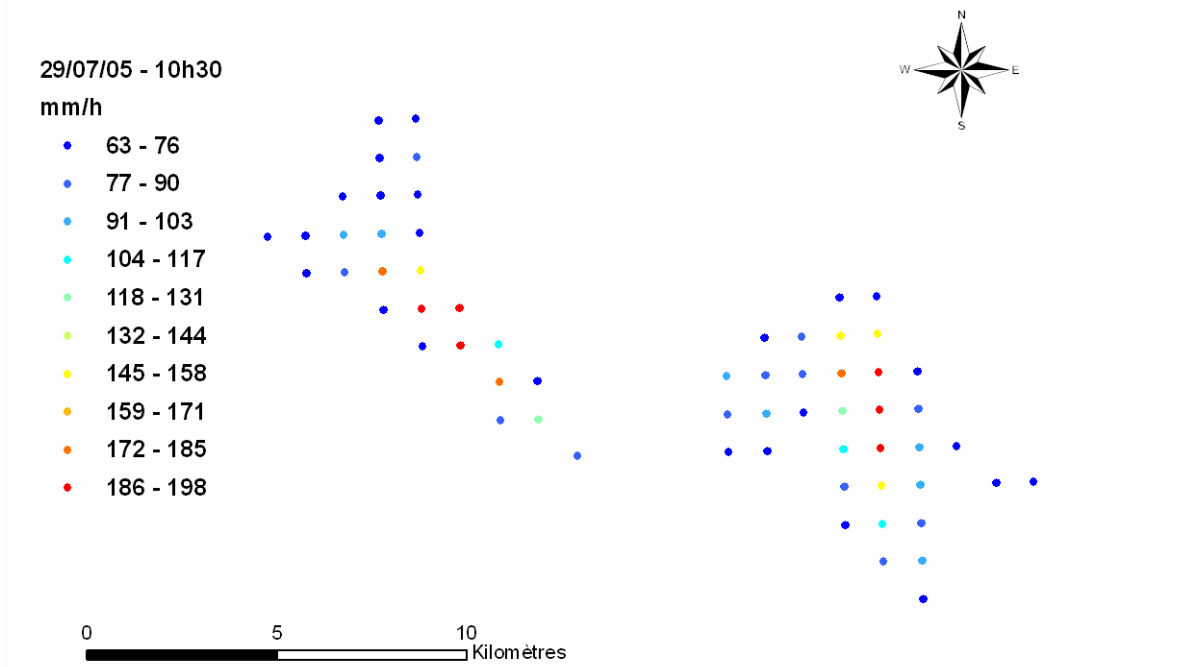


Figure 5.7 : Exemples de noyaux pluvieux de forte intensité sélectionnés et rectifiés, le 29 juillet 2005 à 10h30

Le centre moyen de chacun des noyaux de forte intensité est obtenu en calculant la moyenne des coordonnées x et y de tous les pixels constitutifs des noyaux. Ce centre moyen est pondéré par l'intensité pluvieuse de chaque pixel afin de déterminer le centre d'intensité du noyau en question (fig. 5.8). La détermination de la forme et de la rotation des noyaux fait l'objet de la partie suivante en recourant à la notion d'ellipse directionnelle.

Les centres moyens pondérés constituent donc la représentation ponctuelle des noyaux de forte intensité, et seront utilisés par la suite dans l'étude des trajectoires de ces noyaux. En outre, les intensités moyennes et maximales, ainsi que l'aire du noyau, sont associés dans la table attributaire du *shapefile* (fichier de forme) à chacun des centres moyens pondérés identifiés.

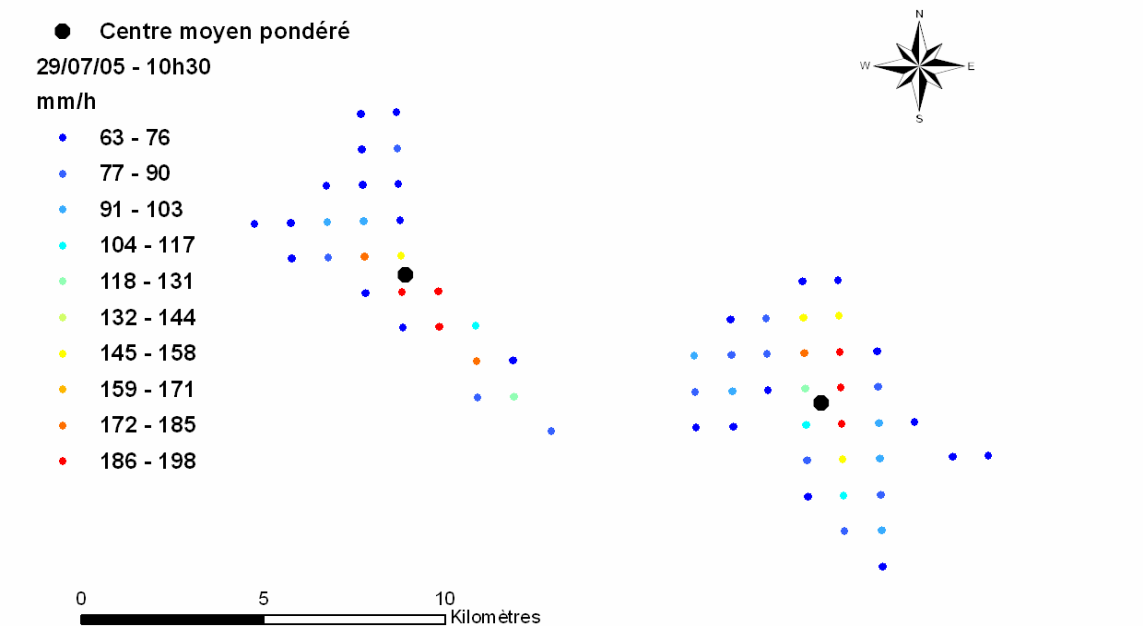


Figure 5.8 : Exemples de noyaux pluvieux de forte intensité avec leurs centres moyens pondérés, le 29 juillet 2005 à 10h30

1.2.2 L'ellipse directionnelle pour l'analyse de la forme et de la rotation

L'ellipse directionnelle (aussi appelée ellipse de distribution directionnelle, ellipse de déviation standard ou ellipse d'écart type) fournit une mesure de la tendance de direction de l'ensemble des pixels constitutifs du noyau de forte intensité. En effet, pour mesurer la tendance d'un ensemble de points, on peut calculer les écarts types suivant les axes x et y du plan. Ces deux mesures définissent alors les axes d'une ellipse regroupant la distribution des pixels du noyau de forte intensité. En effet, les noyaux de forte intensité peuvent présenter différentes formes (fig. 5.7). Ils peuvent adopter une forme plutôt allongée, ou au contraire plus arrondie. Une ellipse directionnelle est donc calculée pour chacun des noyaux identifiés (fig. 5.9).

Le rapport du grand axe de l'ellipse sur le petit axe fournit une indication sur la forme. Plus celui-ci est proche de 1, plus la cellule est arrondie. Et plus il s'en éloigne, plus le noyau est allongé.

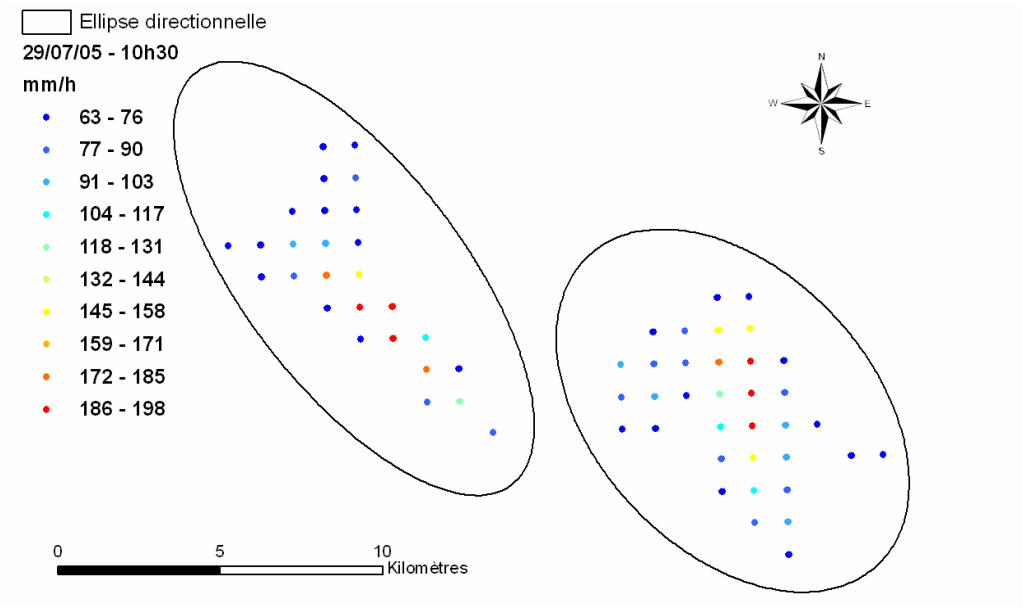


Figure 5.9 : Exemples de noyaux pluvieux de forte intensité avec leurs ellipses directionnelles, le 29 juillet 2005 à 10h30

En outre, les noyaux de forte intensité ne présentent pas tous la même orientation (fig. 5.9). L'ellipse directionnelle va donc nous renseigner sur cette dernière caractéristique, en fournissant un angle de rotation en degrés par rapport au Nord. Par exemple, sur la figure 5.9, le premier noyau (à gauche) possède un angle de rotation de 143°N (angle entre le plus grand axe de l'ellipse et le Nord), et le second noyau (à droite) à quant à lui un angle de rotation de 137°N.

À l'issue de ces deux premières étapes, fondées sur les notions de centre moyen pondéré et d'ellipse directionnelle, les intensités moyennes et maximales, les aires, les formes et les rotations des noyaux de forte intensité sont obtenues. La dernière étape qui repose sur la notion de vecteur de déplacement va nous fournir des renseignements sur les trajectoires de ces noyaux dans la zone de couverture du radar.

1.2.3 *Le vecteur de déplacement pour le suivi de la vitesse et de la direction*

Nous avons vu que cette étude reposait sur l'exploitation des cinq épisodes pluvieux les plus intenses en 18 minutes de la période 2001-2005, et plus précisément sur les données de réflectivité radar au pas de temps de cinq minutes.

Or, un noyau identifié au pas de temps *n* peut aisément être retrouvé au pas de temps *n+1* s'il présente toujours une intensité supérieure à 60 mm/h (fig. 5.10). Ainsi, les noyaux

ont été appariés deux à deux sur chaque pas de temps successifs de cinq minutes, et leurs vecteurs de déplacement ont été créés. Ces derniers ont été obtenus à l'aide de l'extension *Tracking Analyst* de la suite *ArcGis* ®. Ces vecteurs fournissent des informations sur la direction, l'orientation, mais aussi sur la vitesse de déplacement des noyaux (d'après la longueur des vecteurs). Nous obtenons en outre la variance circulaire, qui est une mesure de l'étendue informant si les vecteurs pointent dans la même direction ou non. Plus la valeur est proche de 0, plus les vecteurs ont la même orientation. Plus la valeur est proche de 1, plus il y a de variabilité dans leurs orientations.

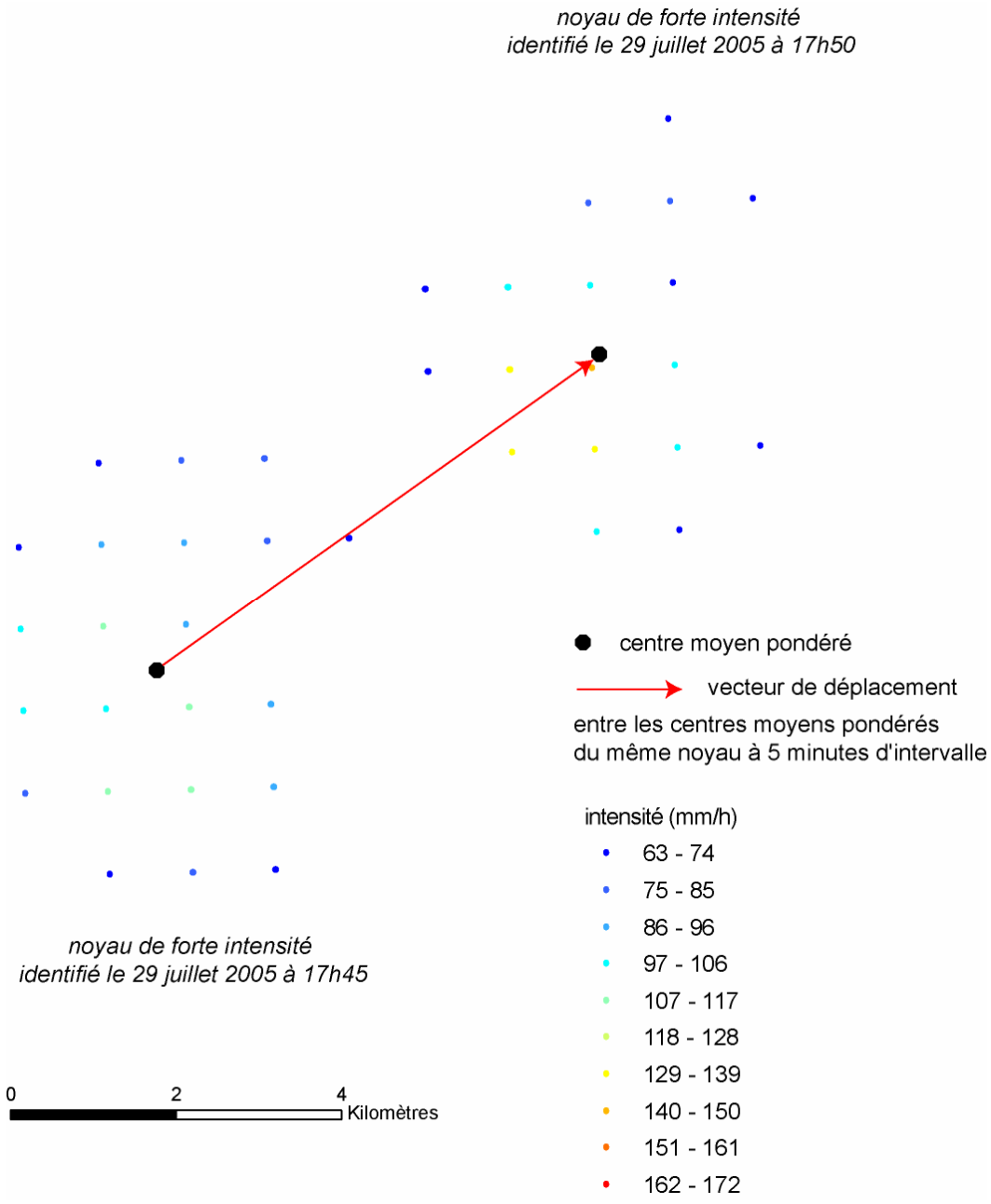


Figure 5.10 : Vecteur de déplacement entre un noyau de forte intensité identifié sur deux pas de temps successifs (le 29 juillet 2005 à 17h45 puis à 17h50)

Au terme du processus d'analyse, nous obtenons huit caractéristiques pour chacun des noyaux identifiés : son intensité maximale, son intensité moyenne, sa superficie, sa forme, sa rotation, son orientation, sa variance circulaire et sa vitesse. Cette méthode est ainsi très riche d'enseignement. Cependant, son principal défaut est sa lenteur d'exécution. En effet, sans automatisation de la méthode, il est pratiquement impossible de l'appliquer à un nombre considérable d'épisodes pluvieux. C'est pourquoi cette dernière a été programmée afin que les étapes successives se fassent automatiquement et d'une manière rapide.

1.2.4 Automatisation de la méthode par programmation d'un modèle de traitement

Les traitements des centres moyens pondérés et des ellipses directionnelles ont été automatisés à l'aide de *Model Builder* de la suite *ArcGis* ®. Ce module permet de programmer et d'enchaîner pratiquement n'importe quelles actions de traitements d'analyse spatiale de base. Pour les traitements plus complexes, des scripts ont été programmés, notamment pour faire passer le nom du *shapefile* vers une expression.

Ce modèle de traitement peut être programmé en automatisant les actions suivantes (fig. 5.11) :

1 Choix du (ou des) *shapefile*(s) à traiter en entrée (réflectivité radar converti avec Marshall-Palmer, 1948)
2 Ajout du champ « intensité »
3 Calcul du champ « intensité » (avec les coefficients correcteurs définis précédemment)
4 Sélection des pixels présentant une intensité supérieure à 60 mm/h (ce seuil peut évidemment être modifié à volonté dans le cadre d'études complémentaires ultérieures)
5 Ajout du champ « intensité moyenne » du noyau de forte intensité
6 Calcul du champ « intensité moyenne » du noyau de forte intensité
7 Ajout du champ « intensité maximale » du noyau de forte intensité
8 Calcul du champ « intensité maximale » du noyau de forte intensité
9 Ajout du champ « date »
10 Programmation d'un script pour faire passer le nom du *shapefile* vers une expression
11 Calcul du champ « date »
12 Création d'une zone tampon de 750 mètres autour des pixels afin de déterminer des zones contiguës d'intensité supérieure à 60 mm/h (actions 12 à 16 en parallèle des actions 5 à 11)

13 Dissociation des zones tampons
14 Ajout d'un champ destiné à identifier chacune des zones tampons
15 Calcul d'un champ pour identifier chacune des zones tampons
16 Suppression des zones tampons « jointes » dès qu'elles ne sont plus nécessaires (après la création du champ d'identification des zones tampons « dissociées »)
17 Jointure spatiale des pixels d'intensité et des zones tampons
18 Ajout d'un champ au *shapefile* des pixels afin que chacun des noyaux de forte intensité possèdent un identifiant différent
19 Calcul du champ précédent (tous les noyaux possèdent un identifiant différent)
20 Calcul des centres moyens pondérés
21 Calcul des ellipses directionnelles
22 Jointure des ellipses avec les noyaux de forte intensité
23 Suppression de la couche des pixels joints avec les zones tampons « dissociées » (inutiles dorénavant)
24 Suppression de la couche des zones tampons « dissociées » (inutiles dorénavant)
25 Suppression de l'ancien *shapefile* des noyaux de forte intensité (inutile, issu de l'étape 11)
26 Création d'une table de statistiques résumant les caractéristiques calculées à l'issue des étapes précédentes
27 Jointure spatiale du *shapefile* des centres moyens pondérés et de la table des statistiques
28 Suppression du *shapefile* des ellipses directionnelles

À l'issue de ce processus de traitements, un *shapefile* avec les centres moyens pondérés est créé, contenant en table attributaire toutes les caractéristiques d'intérêt des noyaux de forte intensité. Il convient de remarquer que le *Model Builder* rencontre des difficultés liées à la programmation pour enchaîner deux jointures spatiales successives. Il s'agit d'un défaut avéré reconnu par le fabricant *Esri* ® qui devrait être corrigé dans les éditions prochaines du logiciel. Ainsi, nous avons fait tourner les étapes 1 à 16 dans un premier modèle dont les sorties venaient alimenter un second modèle qui reprenait les étapes 17 à 28.

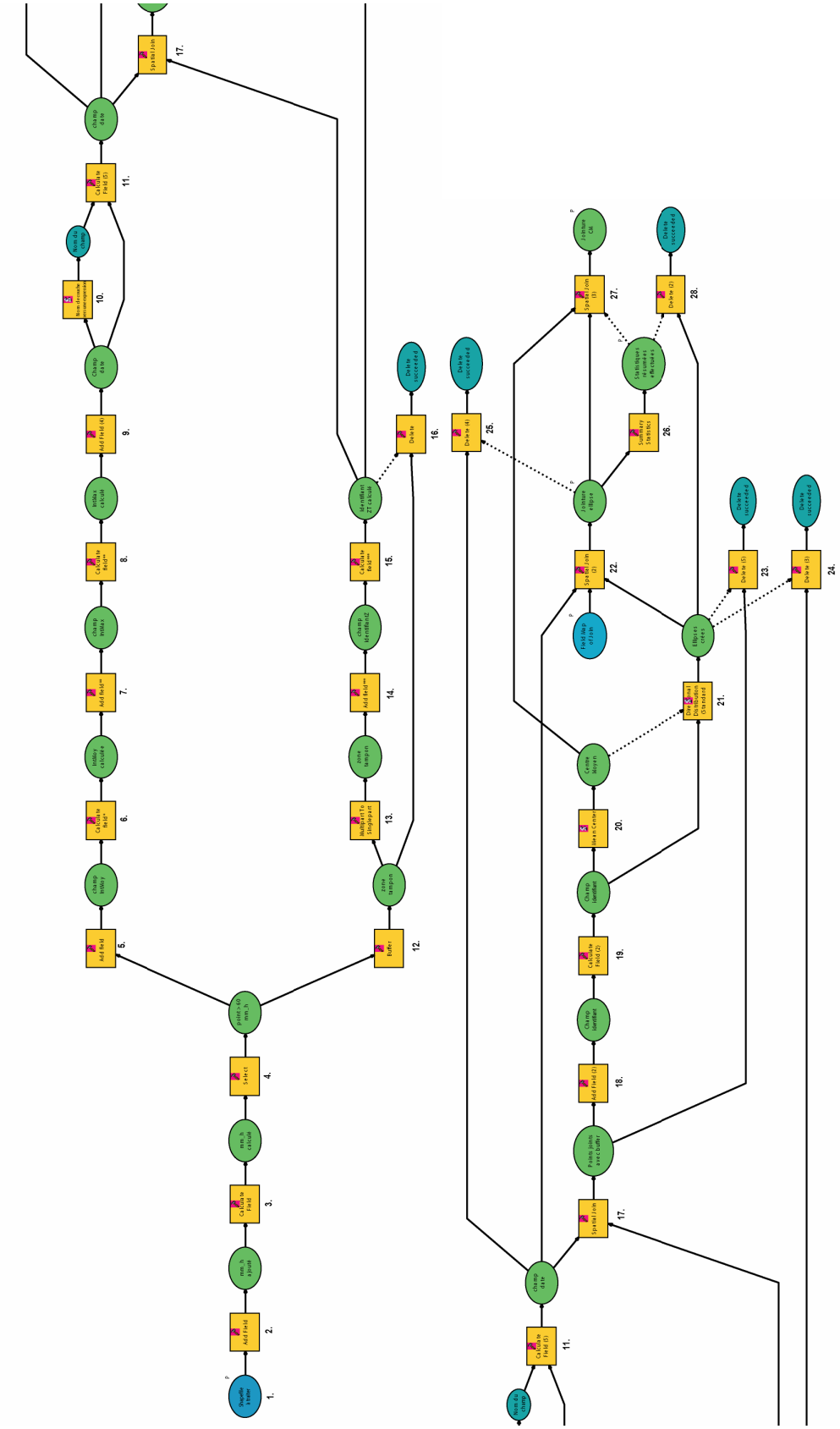


Figure 5.11 : Modèle d'automatisation de la chaîne de traitement (présenté en deux parties). Les numéros renvoient à la description des traitements. Les liaisons en pointillés indiquent les conditions de réalisation de l'opération.

2. Application de la méthode aux épisodes intenses et mise en évidence de comportements similaires

La méthode précédemment décrite est appliquée aux cinq épisodes pluvieux les plus remarquables en termes d'intensité en 18 minutes de la période 2001 à 2005, par ordre chronologique (et non par un classement d'origine génétique et de logique fonctionnelle qui constitue l'une des perspectives de ce travail). Dans un premier temps, une étude descriptive de la distribution spatiale des noyaux de forte intensité pluvieuse sur l'ensemble de la couverture du radar météorologique de Saint-Nizier d'Azergues va être effectuée, ainsi que l'analyse des trajectoires de ces noyaux. Ensuite, dans un second temps, nous nous intéresserons aux variations dans le temps des caractéristiques des noyaux de forte intensité, ainsi qu'à leurs interrelations en les confrontant les unes aux autres.

2.1 Episode du 09 septembre 2002

2.1.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs

L'épisode pluvieux du 09 septembre 2002 commence à 15h12 sur l'agglomération lyonnaise et a duré 8h06. Il s'agit de l'épisode le plus intense en 18 minutes de la période 2001-2005, avec une intensité de 113,3 mm/h enregistrée avec le réseau pluviométrique du Grand Lyon.

Les centres moyens pondérés des noyaux de pluie intense de l'épisode pluvieux du 09 septembre 2002 se répartissent principalement dans la vallée du Rhône (fig. 5.12). Les noyaux les plus éloignés se situent à 190 km, au nord et au sud de Lyon. Le Grand Lyon ne

concentre pas particulièrement plus de noyaux de forte intensité que d'autres secteurs voisins, comme dans le nord de la vallée de la Saône (fig. 5.13).

Les vecteurs de déplacement des noyaux de forte intensité indiquent un déplacement assez rectiligne du sud-ouest au nord-est (fig. 5.14), que laissait déjà présager la distribution des centres moyens pondérés. Sur le territoire de l'agglomération urbaine, le passage rectiligne d'un noyau de forte intensité peut être remarqué sur le nord-ouest de l'agglomération.

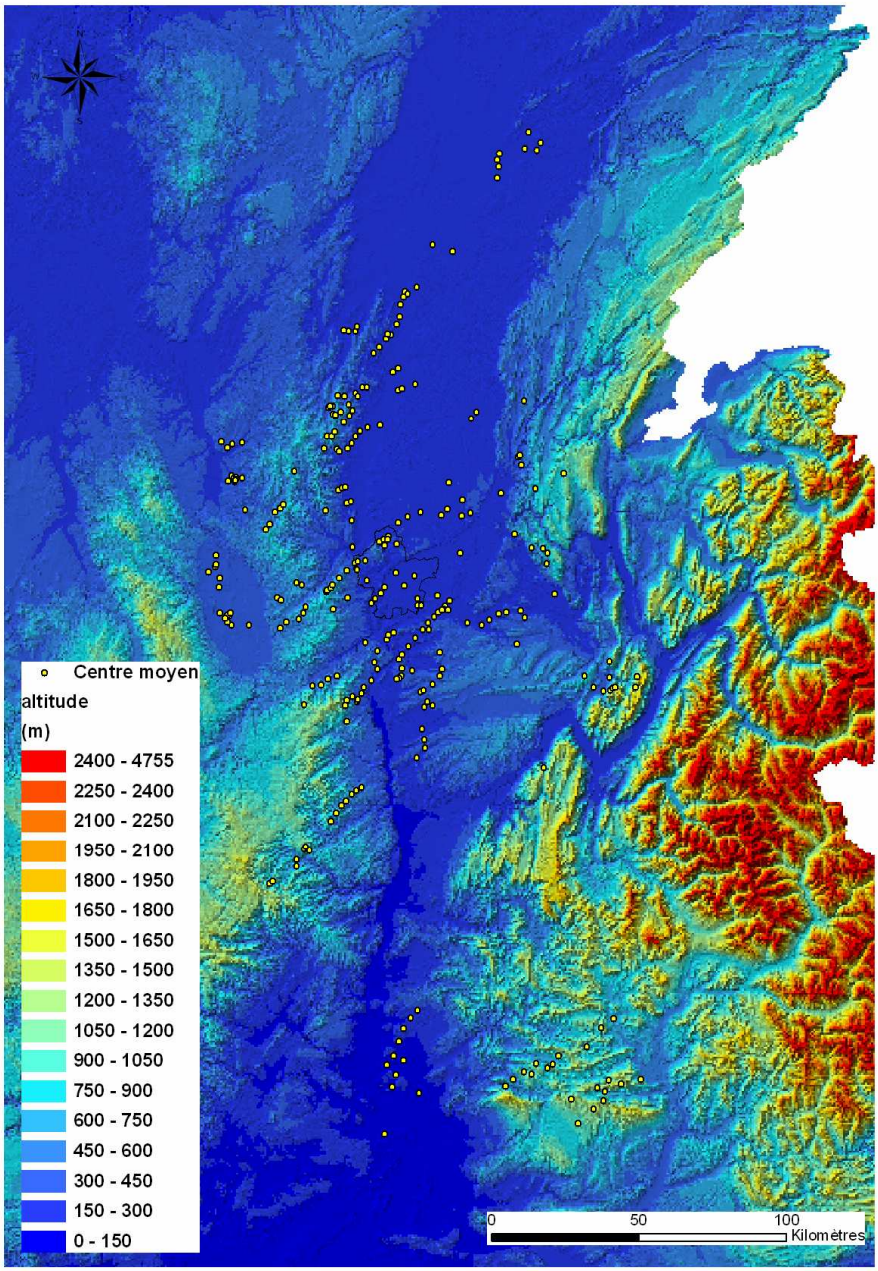


Figure 5.12 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

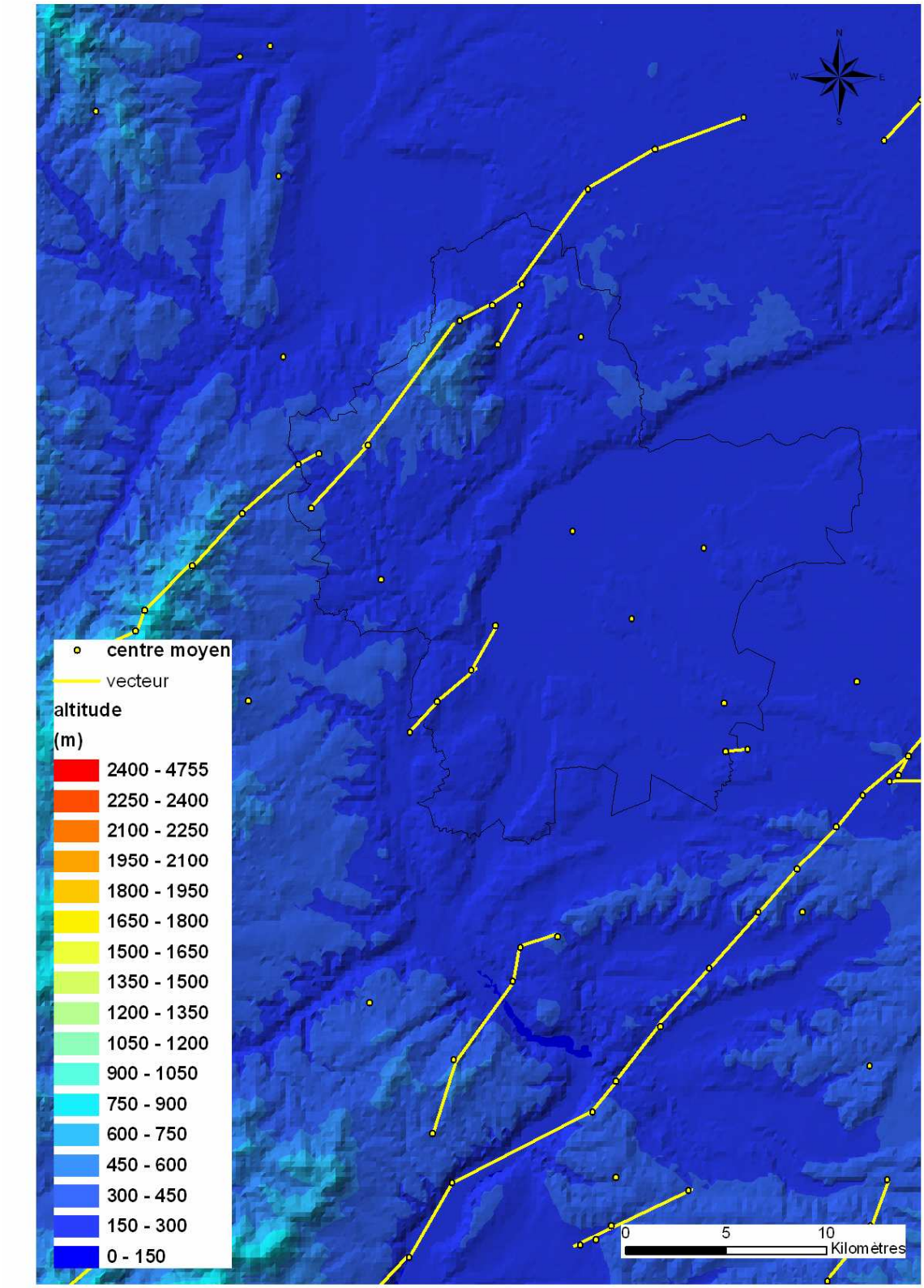


Figure 5.13 : Centres moyens pondérés et vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 au dessus du territoire du Grand Lyon

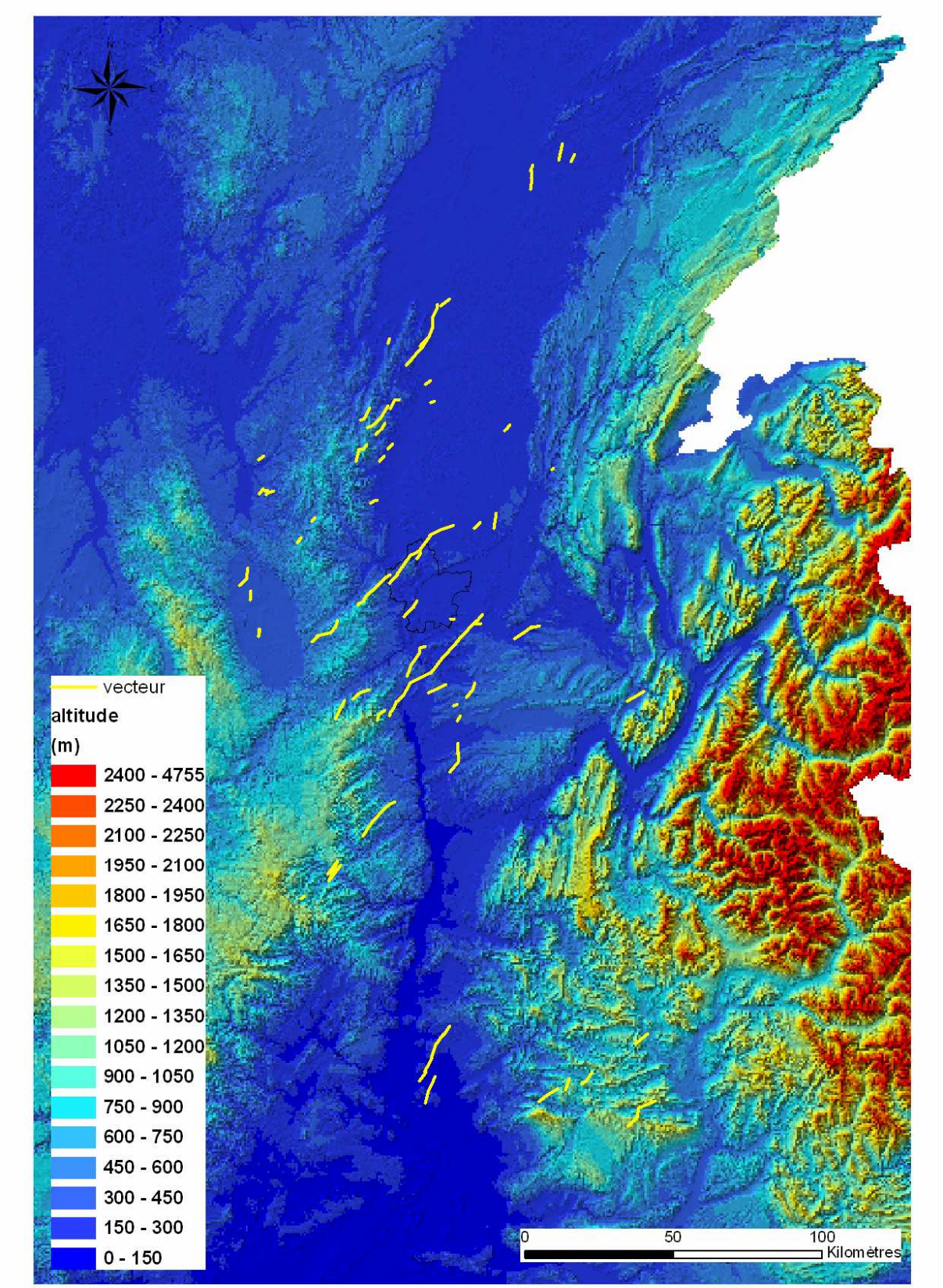


Figure 5.14 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

2.1.2 *Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité*

2.1.2.1 Analyse statistique globale

Le processus d'analyse a identifié 290 noyaux de pluie de forte intensité lors de l'épisode du 09 septembre 2002, avec en moyenne 2,2 amas par pas de temps de cinq minutes dans l'ensemble de la couverture radar (tableau 5.2). Cependant, le nombre maximum de noyaux identifiés le fut à 15h10 et à 16h20 avec sept entités. L'intensité maximale moyenne des noyaux est de 141,6 mm/h, avec des pics d'intensité atteignant les 427 mm/h. Sur le territoire du Grand Lyon, l'intensité maximale relevée est de 278 mm/h. Cette valeur est bien supérieure à l'intensité de 113,3 mm/h en 18 minutes relevée avec les pluviomètres, et toujours plus élevée que celle de 222 mm/h en six minutes enregistrée avec ces mêmes dispositifs de mesure ponctuelle.

L'analyse de l'intensité moyenne et de l'aire des noyaux de forte intensité est à prendre avec précaution, en conservant en mémoire qu'uniquement les pixels présentant des intensités supérieures à 60 mm/h ont été utilisés dans l'analyse. Cependant, ces caractéristiques nous donnent des indications très intéressantes. En effet, sous un noyau de forte intensité tel que défini par la procédure, l'intensité moyenne est de 93 mm/h, avec un faible écart type de 19,8 mm/h. L'aire maximale relevée d'un noyau est de 51 km², avec une moyenne de 10,5 km². La forme des noyaux est légèrement allongée (indice de forme de 2,6). Leur rotation est de 82°N, avec toutefois un écart type très variable de 43,3°N.

Au niveau des caractéristiques des trajectoires, nous obtenons des noyaux de forte intensité qui se déplacent d'un mouvement rectiligne du sud-ouest au nord-est, avec une orientation de 36,8°N précisément. Les noyaux dévie nt très peu de cette trajectoire, car l'écart type de l'orientation est seulement de 8,2°N, ce qui est confirmé par la variance circulaire moyenne de 0,04. La vitesse moyenne des noyaux de forte intensité est de 36,4 km/h. Cette vitesse est relativement constante, avec un écart type de 8,6 km/h. Nous relevons cependant des pics de vitesse de 59,2 km/h, et des minimums qui restent assez élevés à 19,4 km/h.

	Noyaux par pas de temps	**Intensité maximale** (mm/h)	**Intensité moyenne** (mm/h)	**Aire** (km²)	**Forme**	**Rotation** (°N)	**Orientation** (°N)	**Variance circulaire**	**Vitesse** (km/h)
Moyenne	2,2	141,6	93,0	10,5	2,6	82	36,8	0,04	36,4
Écart Type	1,6	66,1	19,8	8,8	1,9	43,3	8,2	0,03	8,6
Maximum	7	427	159	51	12,9	178,5	58,5	0,12	59,2
Minimum	0	66	60	2	1	9,8	21,7	0	19,4

Tableau 5.2 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 09 septembre 2002

2.1.2.2 Analyse des caractéristiques au cours du temps

Le nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode a varié au cours du temps. D'un faible nombre de 12h20 à 13h40, l'épisode connaît ensuite une hausse de la quantité de noyaux jusqu'à 18h00 environ avec des pics à sept éléments par pas de temps, avant de connaître une baisse jusqu'à la fin de l'épisode (fig. 5.15).

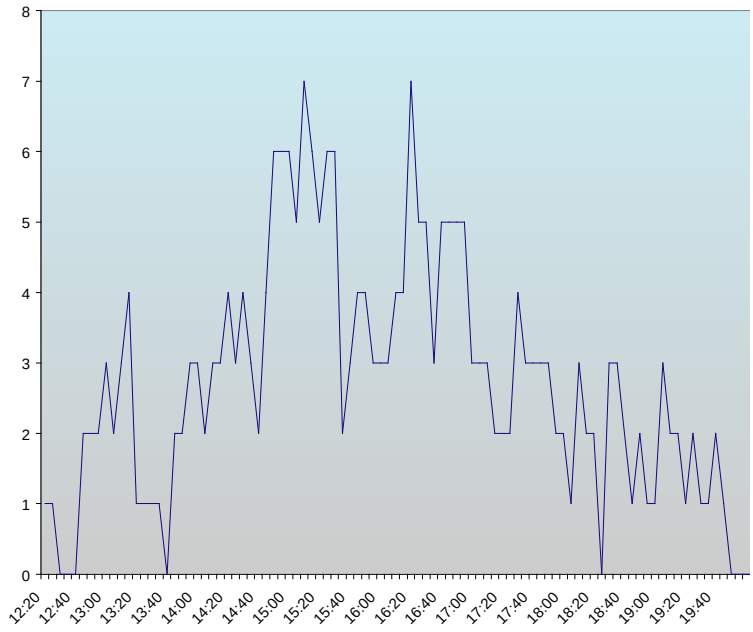


Figure 5.15 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

L'intensité maximale moyenne des noyaux de forte intensité par pas de temps de cinq minutes est très variable au cours de l'épisode, comme en témoigne la figure 5.16, et pratiquement toujours au-dessus de 100 mm/h. Cependant, l'intensité moyenne des noyaux est relativement constante au cours du temps, avec une intensité comprise entre 80 et 100 mm/h, qui diminue sensiblement à la fin de l'épisode (fig. 5.17).

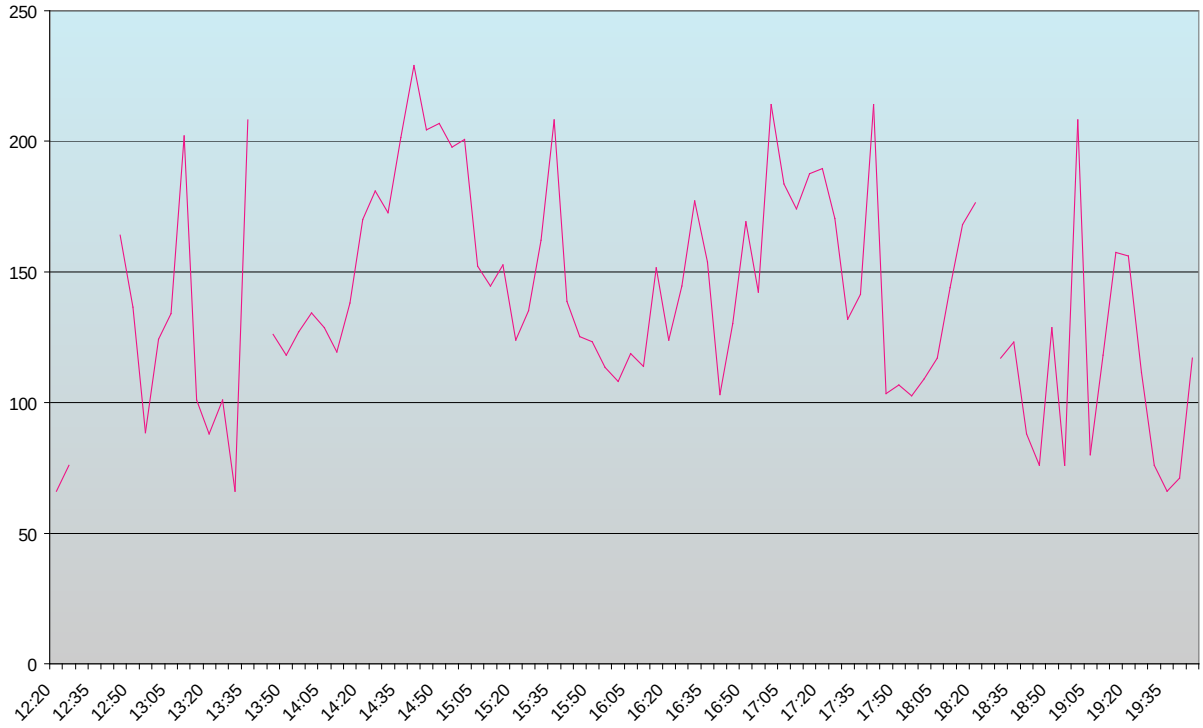


Figure 5.16 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

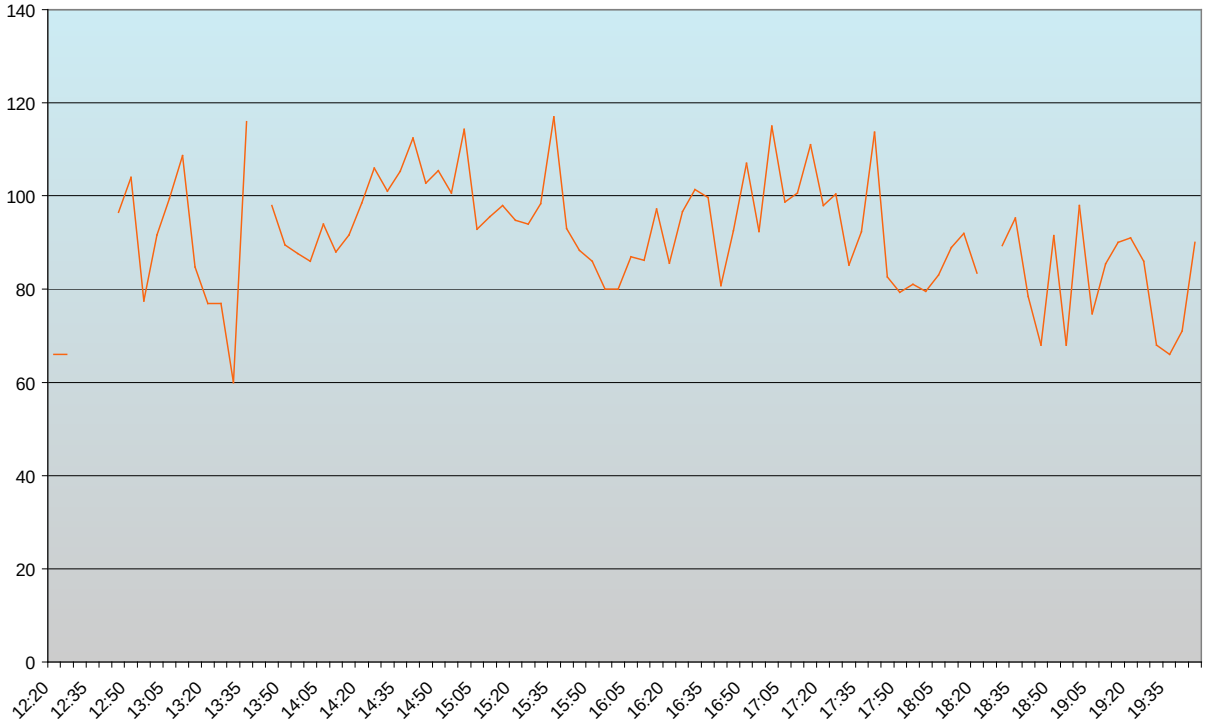


Figure 5.17 : Moyennes des intensités moyennes (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

La superficie moyenne des noyaux varie très fortement d'un pas de temps à un autre (fig. 5.18). La forme des noyaux a très peu varié en restant légèrement allongée, avec des indices compris la plupart du temps entre 1 et 3, sauf en fin d'épisode où les amas de forte intensité ont adopté des formes très étirées (fig. 5.19). La rotation des noyaux est aussi extrêmement variable (fig. 5.20).

L'orientation des vecteurs de déplacements des noyaux de forte intensité est relativement constante tout au long de l'épisode, et oscille autour de 40°N (fig. 5.21). Il en est de même pour la vitesse qui tourne autour de 35 km/h, avec de rares accélérations à 15h35 et 16h50 notamment (fig. 5.22).

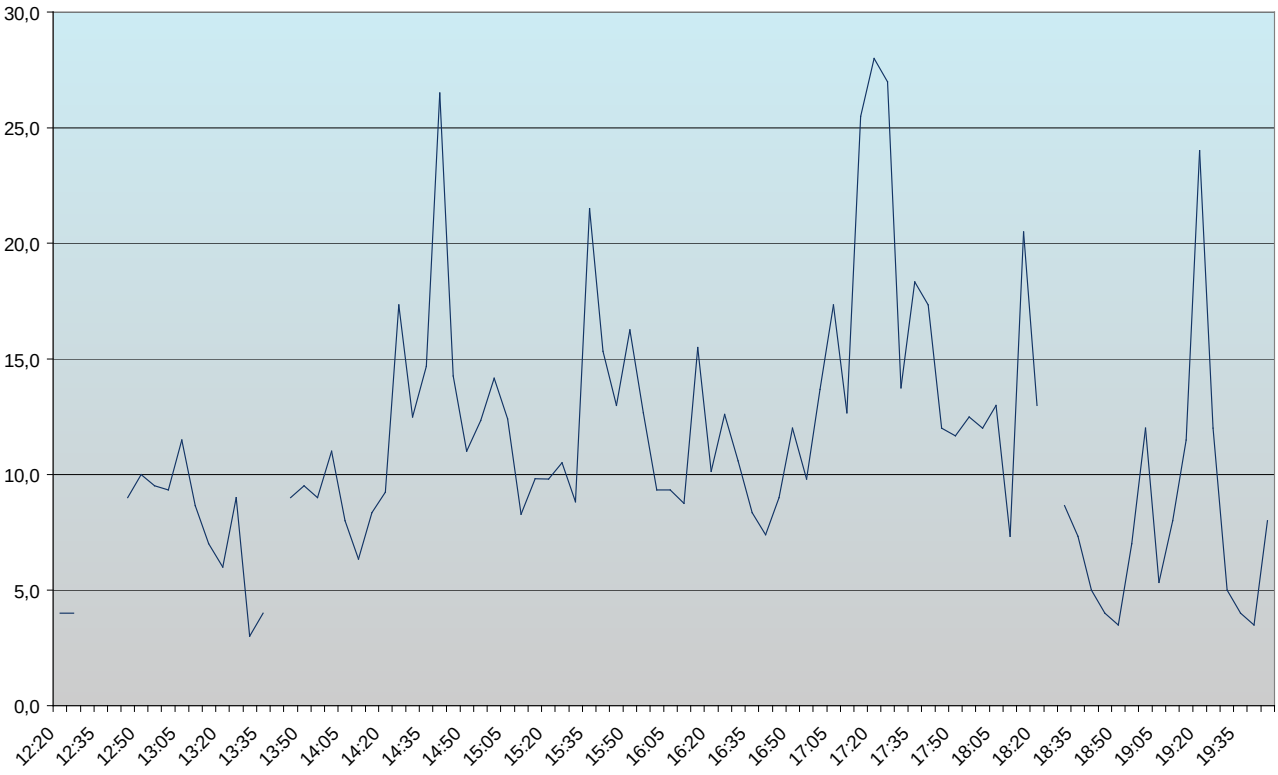


Figure 5.18 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

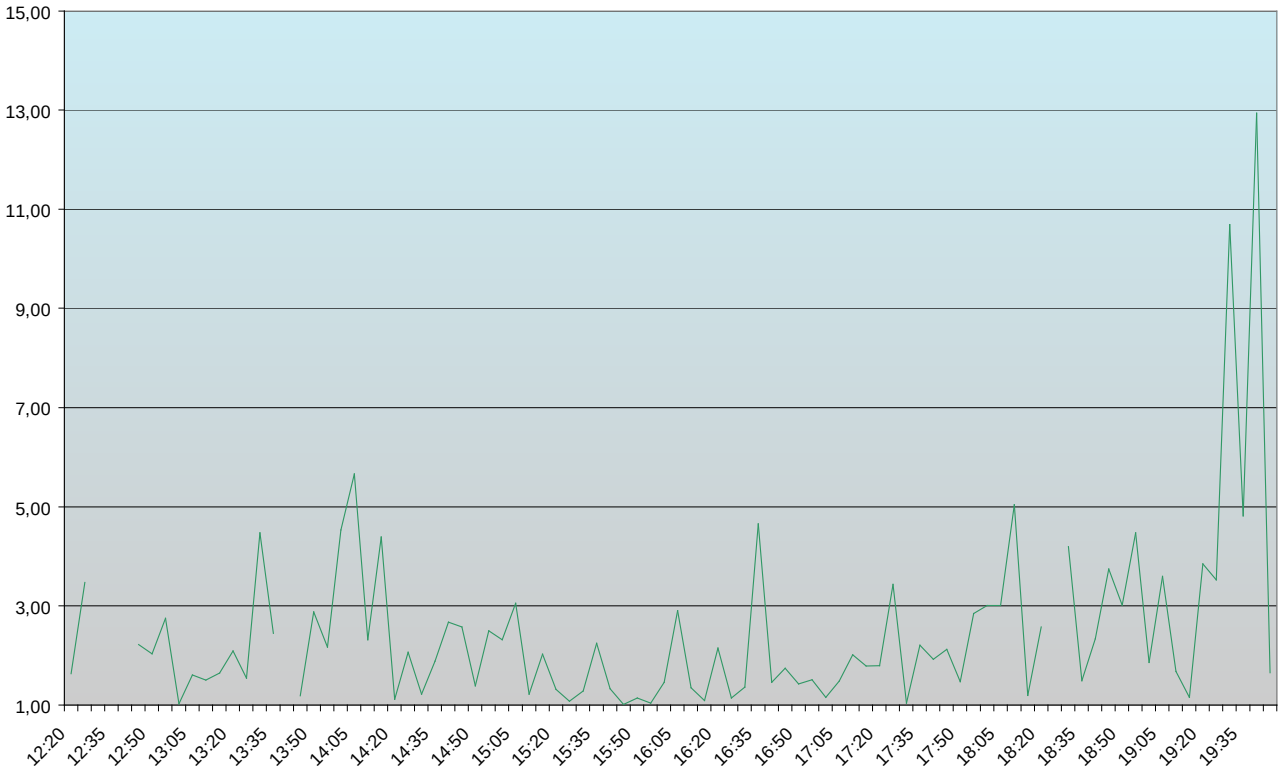


Figure 5.19 : Forme moyenne des noyaux (de 1 : arrondie à 13 : très allongée) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

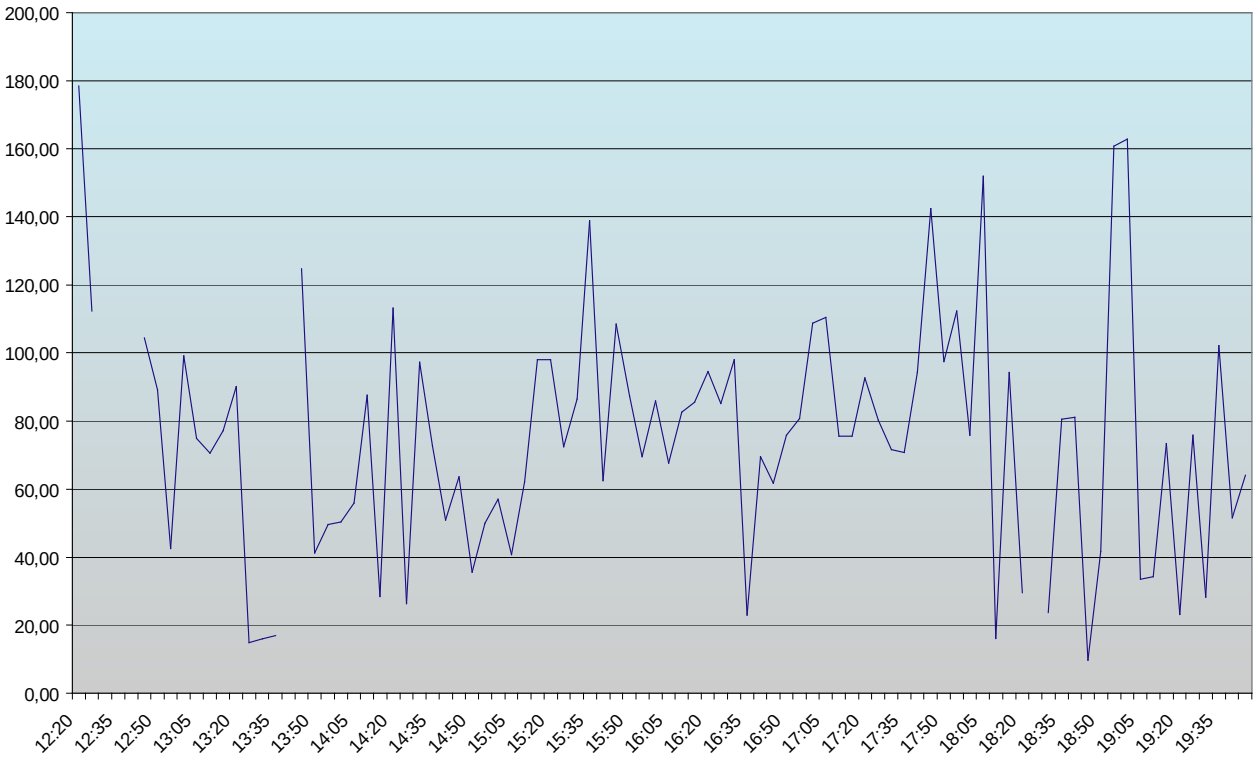


Figure 5.20 : Rotation moyenne des noyaux (°N) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

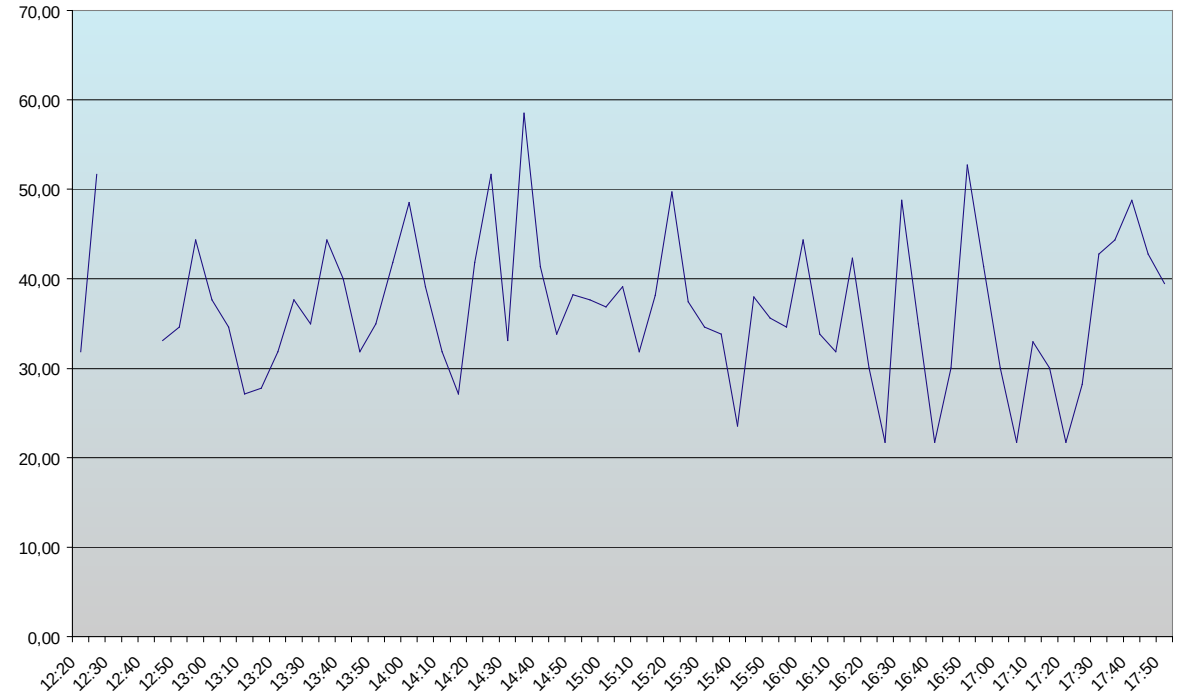


Figure 5.21 : Orientation moyenne des vecteurs de déplacement des noyaux (°N) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

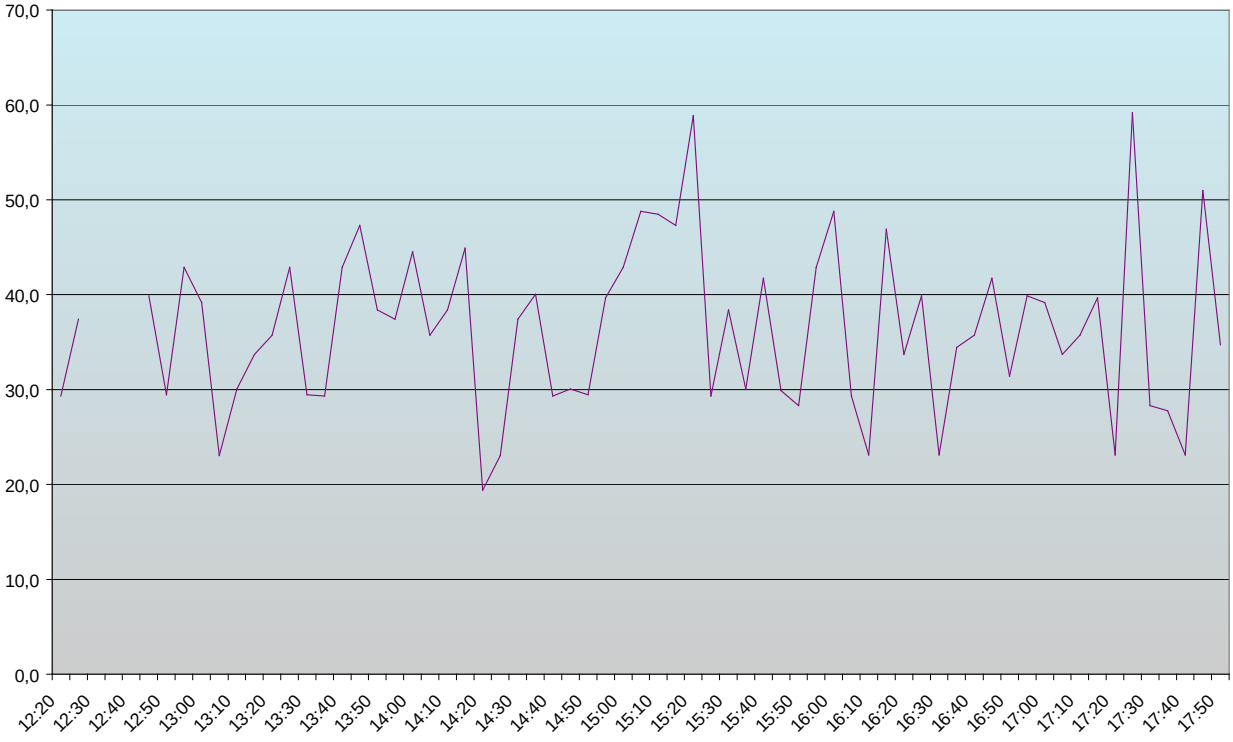


Figure 5.22 : Vitesse moyenne des noyaux (km/h) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002

2.1.2.3 Relations entre les caractéristiques

L'analyse des noyaux de pluie de forte intensité a déjà permis d'obtenir des statistiques globales fortement intéressantes sur leurs caractéristiques, notamment sur leurs intensités maximales, leurs orientations et leurs vitesses. L'étude de ces caractéristiques dans le temps s'est aussi révélée très enrichissante. L'analyse va maintenant être poursuivie en confrontant ces caractéristiques deux à deux, pour essayer de dégager des relations entre elles. Par exemple, la vitesse des noyaux a-t-elle une influence sur l'intensité maximale, la forme joue-t-elle sur la superficie, ou encore l'orientation pèse-t-elle sur la rotation ? A cette fin, des régressions simples (linéaires, logarithmiques ou exponentielles) entre ces variables sont réalisées.

La régression entre les caractéristiques « intensité maximale » et « intensité moyenne » des noyaux de forte intensité du 09 septembre 2002 se révèle très cohérente, avec un coefficient de détermination de 0,7 (fig. 5.23). Il n'y a rien de très surprenant à cela, l'intensité moyenne des noyaux est conditionnée par l'intensité maximale. Cependant, une autre analyse inter-caractéristiques est plus intéressante. Il s'agit de la régression entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » qui présente un r^2 de 0,27. D'après cette relation et dans les limites du coefficient de détermination, plus le noyau présente des intensités maximales élevées, plus sa superficie est importante (fig. 5.24).

Les relations entre les autres caractéristiques sont moins porteuses d'enseignement. En effet, toutes les combinaisons possibles ont été effectuées et aucune relation ne ressort vraiment. Par exemple, il n'existe pas de relation entre la vitesse et l'intensité maximale des noyaux, l'intensité moyenne et l'orientation, ou encore la forme des amas et leur rotation (fig. 5.25).

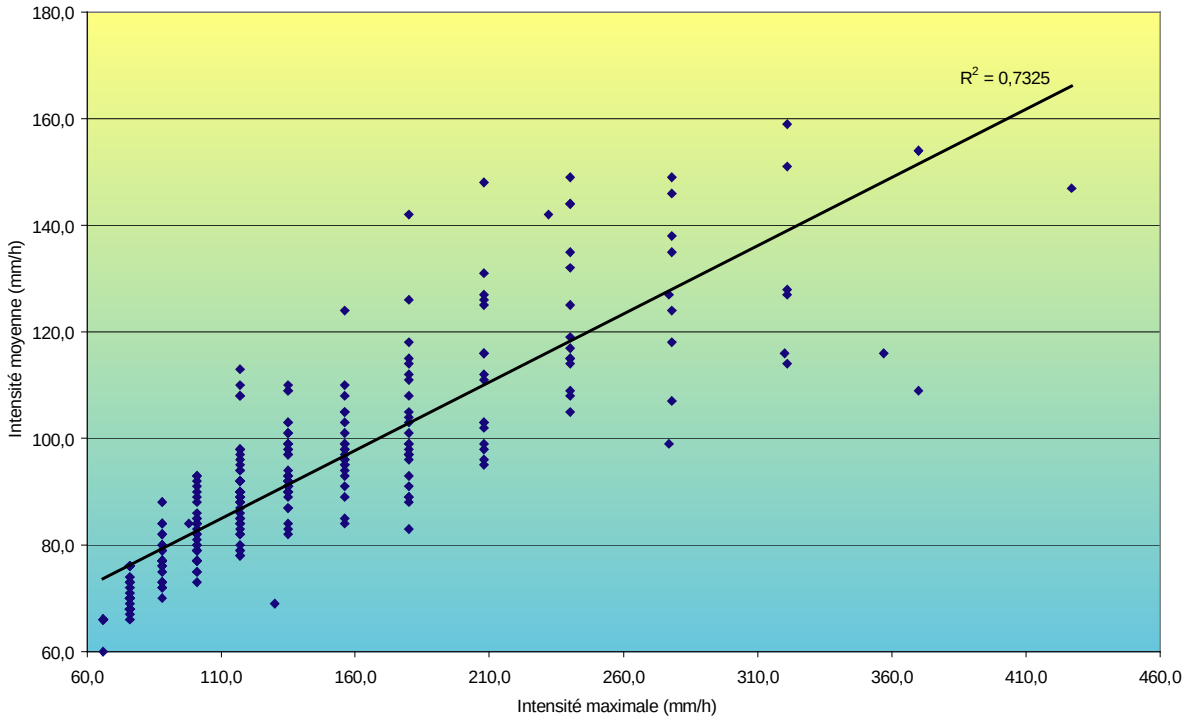


Figure 5.23 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « intensité moyenne » des noyaux de forte intensité du 09 septembre 2002

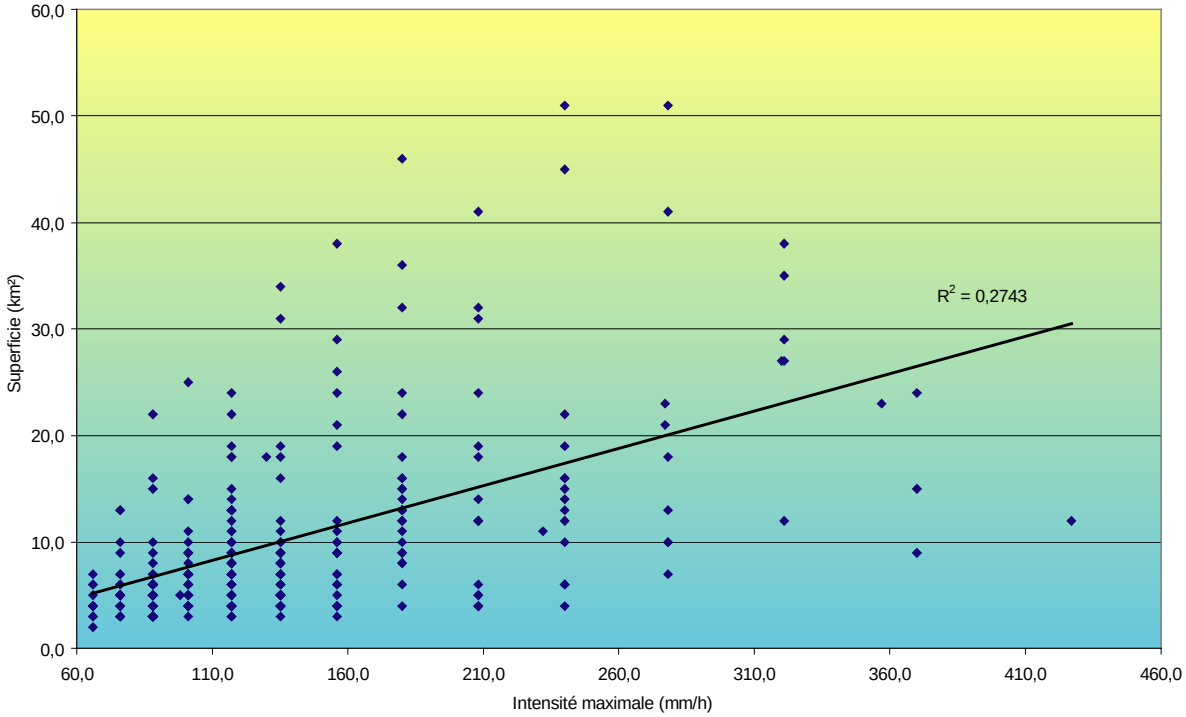


Figure 5.24 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie »

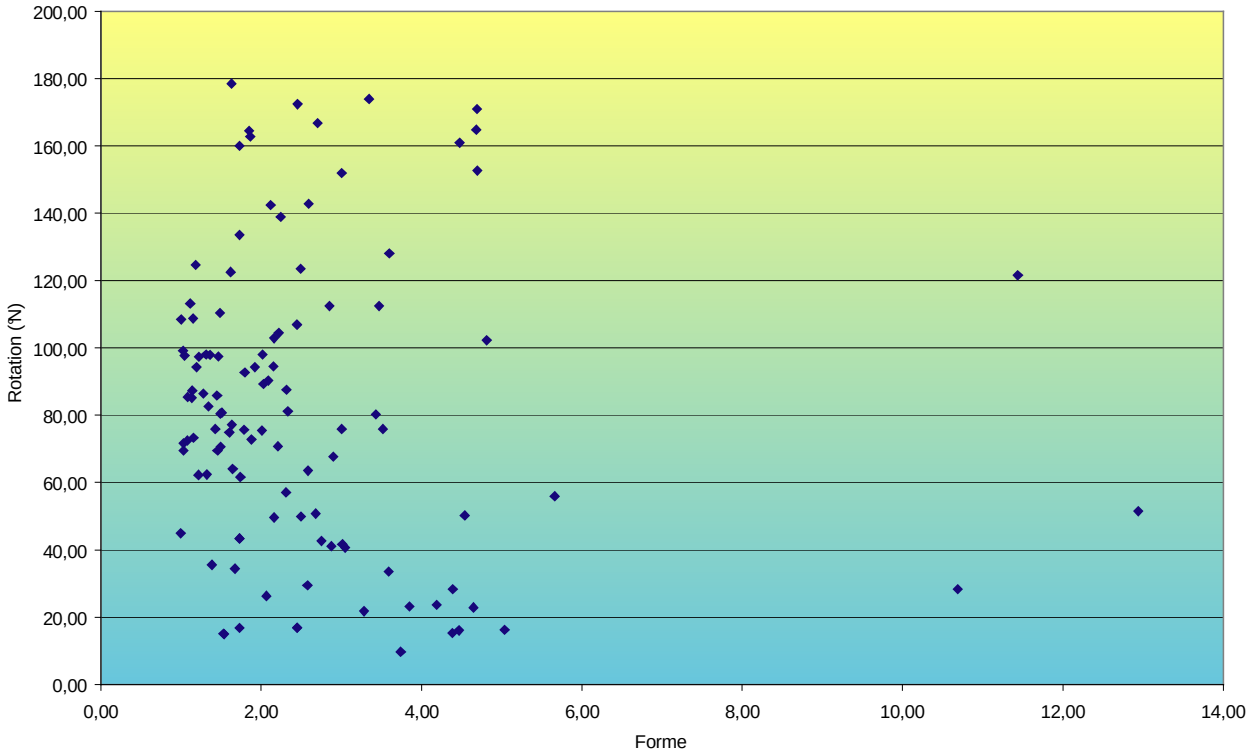


Figure 5.25 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « forme » et « rotation »

2.2 Episode du 19 septembre 2002

2.2.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs

L'épisode pluvieux du 19 septembre 2002 a commencé à 15h06 sur l'agglomération lyonnaise et a duré 2h18. Il s'agit du quatrième épisode le plus intense en 18 minutes de la période 2001-2005, avec une intensité de 90 mm/h enregistrée avec le réseau pluviométrique du Grand Lyon. L'intensité maximale relevée en six minutes a été de 102 mm/h.

Les noyaux de forte intensité identifiés pour cet épisode se répartissent plutôt au nord et à l'ouest du Grand Lyon. Tout comme pour l'épisode précédent du 09 septembre 2002, le territoire de l'agglomération lyonnaise n'est pas le secteur le plus touché par les noyaux de forte intensité, au contraire de zones situées notamment un peu plus au nord, dans la vallée de la Saône ou à l'est du Morvan (fig. 5.26). Les vecteurs de déplacement traduisent des

trajectoires venant globalement de l'ouest. Certains noyaux adoptent cependant des trajectoires légèrement inclinées vers le nord ou le sud (fig. 5.27).

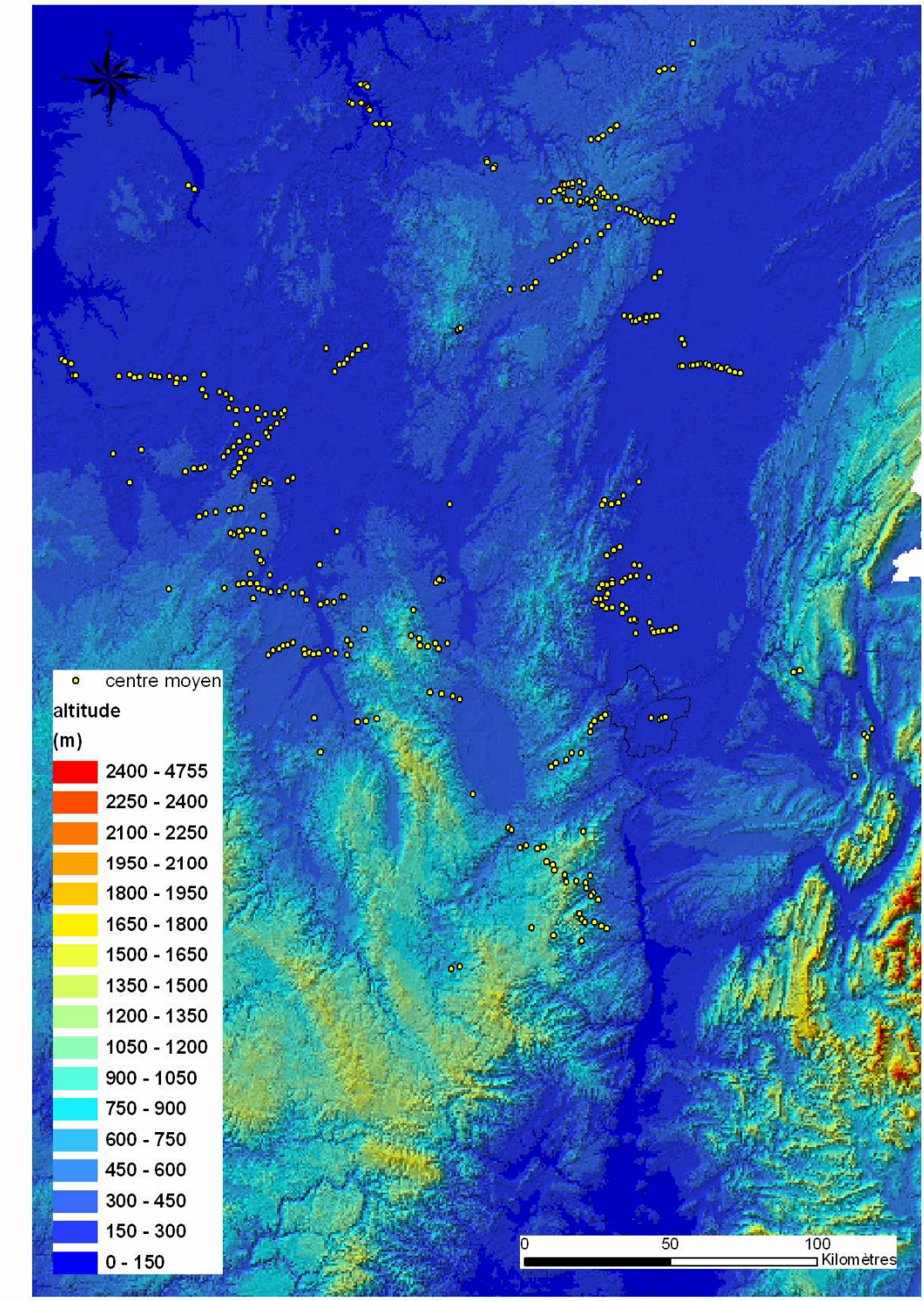


Figure 5.26 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 19 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

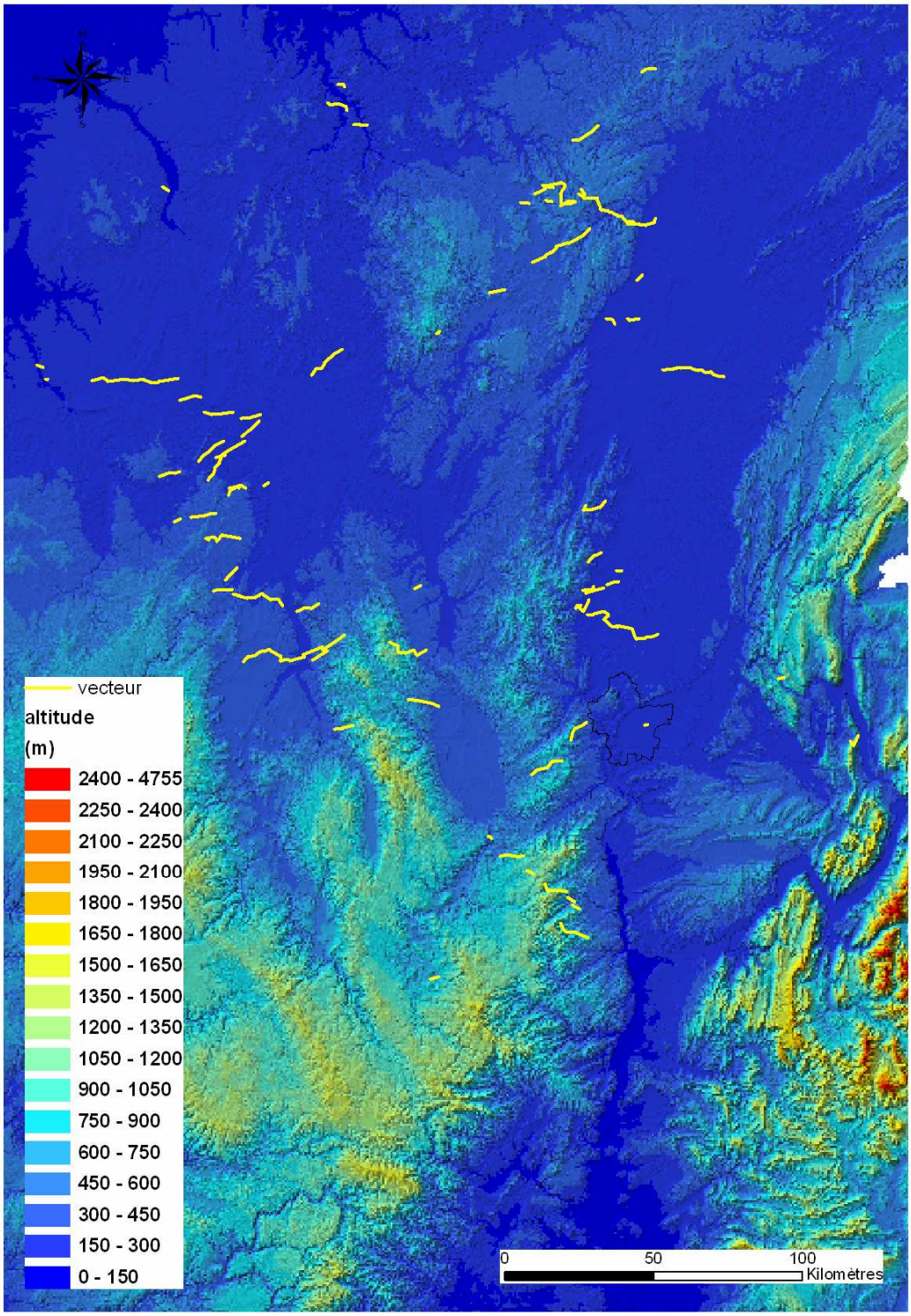


Figure 5.27 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

2.2.2 *Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité*

2.2.2.1 Analyse statistique globale

La chaîne de traitement a identifié 378 noyaux de pluie de forte intensité lors de l'épisode du 19 septembre 2002. En moyenne, 4,9 noyaux par pas de temps de cinq minutes ont été identifiés dans l'ensemble de la couverture radar (tableau 5.3). L'intensité relevée la plus forte a été de 285 mm/h, et les noyaux présentaient en moyenne des intensités maximales de 129 mm/h avec des aires de 9,6 km². Sur le Grand Lyon, l'intensité maximale enregistrée a été de 138 mm/h, ce qui est supérieur aux 102 mm/h mesurés avec le réseau de mesure au sol en six minutes.

Les noyaux de forte intensité ont globalement adopté des trajectoires de l'ouest vers l'est, avec une orientation moyenne de 80,2°N, et un très faible écart type de 14,9°N. La variance circulaire moyenne reste faible, avec 0,2. La vitesse des noyaux est plus faible que lors de l'épisode du 09 septembre 2002, avec 30,3 km/h en moyenne. L'écart type est faible, seulement 8,9 km/h, avec cependant une pointe de vitesse à 62,4 km/h et un minimum à 18,8 km/h.

	Noyaux par pas de temps	**Intensité maximale** (mm/h)	**Intensité moyenne** (mm/h)	**Aire** (km²)	**Forme**	**Rotation** (°N)	**Orientation** (°N)	**Variance circulaire**	**Vitesse** (km/h)
Moyenne	4,9	129,0	91,9	9,6	1,8	77,7	80,2	0,15	30,3
Écart Type	1,9	44,3	17,8	6,5	0,7	22,4	14,9	0,15	8,9
Maximum	9	285	174	41	5,1	147,6	111,2	0,74	62,4
Minimum	1	67	67	2	1	31,3	41,9	0,00	18,8

Tableau 5.3 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 19 septembre 2002

2.2.2.2 Analyse des caractéristiques au cours du temps

Le nombre de noyaux de forte intensité a fortement évolué au cours du temps, avec deux pics, de 12h35 à 13h35, et de 15h30 à 17h15, où l'on a compté jusqu'à neuf noyaux dans un même pas de temps (fig. 5.28).

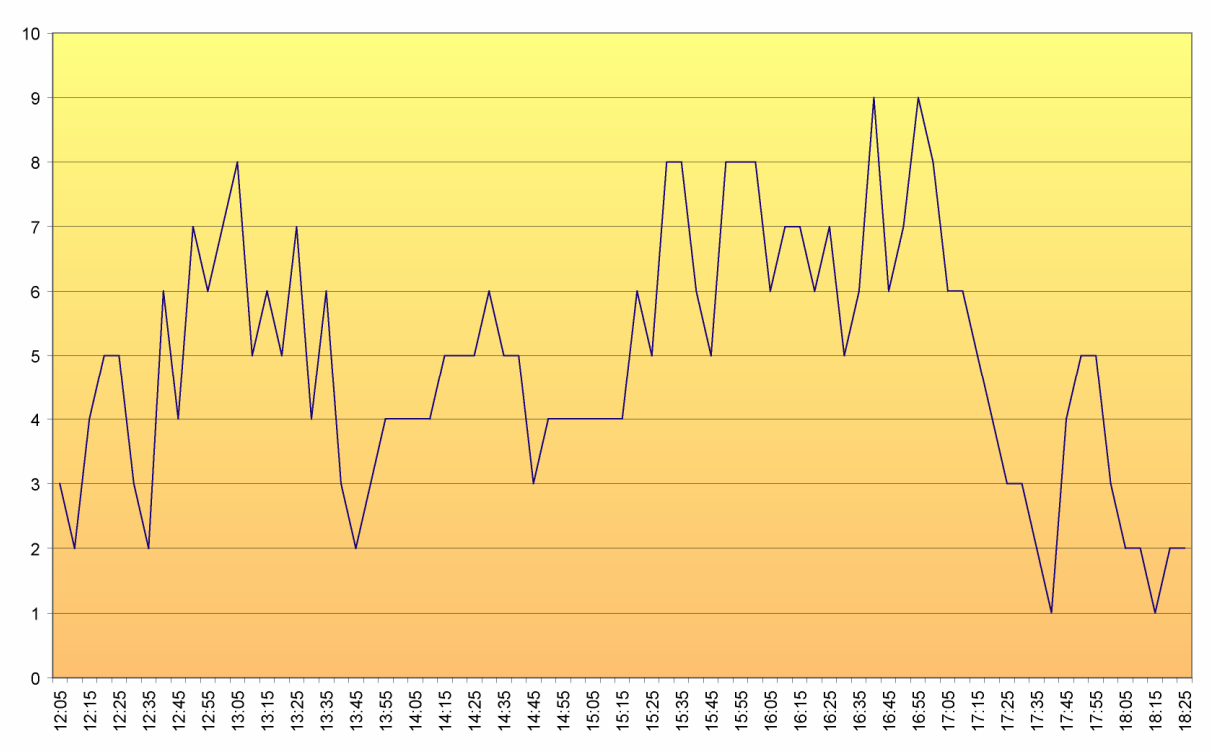


Figure 5.28 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 19 septembre 2002

L'intensité moyenne des noyaux de forte intensité identifiés par pas de temps a peu varié au cours de l'épisode. En effet, elle est pratiquement toujours restée comprise entre 80 et 100 mm/h (fig. 5.29). Il en est de même pour l'intensité maximale (fig. 5.30). Très constante et comprise entre 100 et 150 mm/h, cette dernière a cependant connu un pic de très forte intensité maximale moyenne avec 246 mm/h à 17h40. L'allure de la courbe de la moyenne de l'intensité maximale par pas de temps est à rapprocher de celle de la superficie des noyaux au cours de l'épisode. En effet, nous retrouvons les mêmes variations, avec une superficie constante des noyaux au cours de l'épisode et une forte augmentation à la fin de celui-ci (fig. 5.31). Pour finir, l'orientation des vecteurs de déplacement des noyaux de forte intensité est restée, la plupart du temps, entre 60°N et 100°N (fig. 5.32), et la vitesse est, elle aussi, restée assez constante, aux alentours de 30 km/h, avec deux accélérations, à 13h20 et 15h15 (fig. 5. 33).

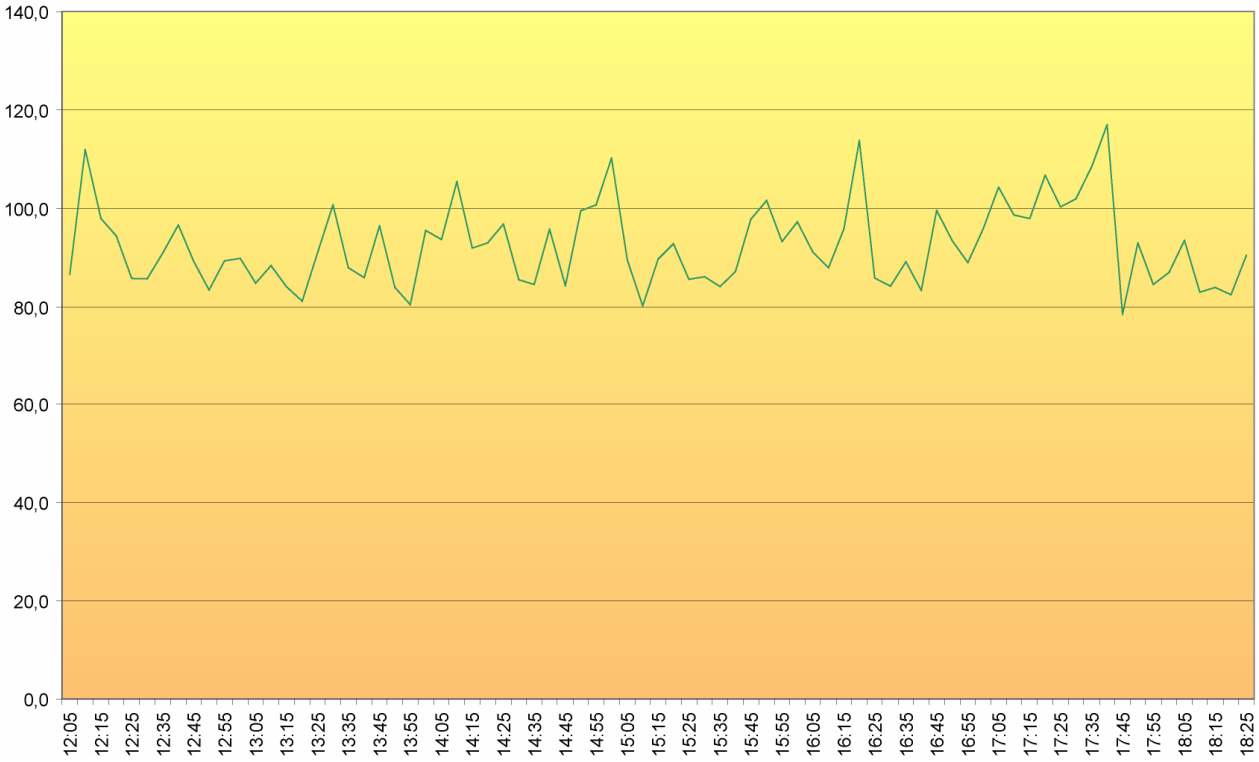


Figure 5.29 : Moyennes des intensités moyennes (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode

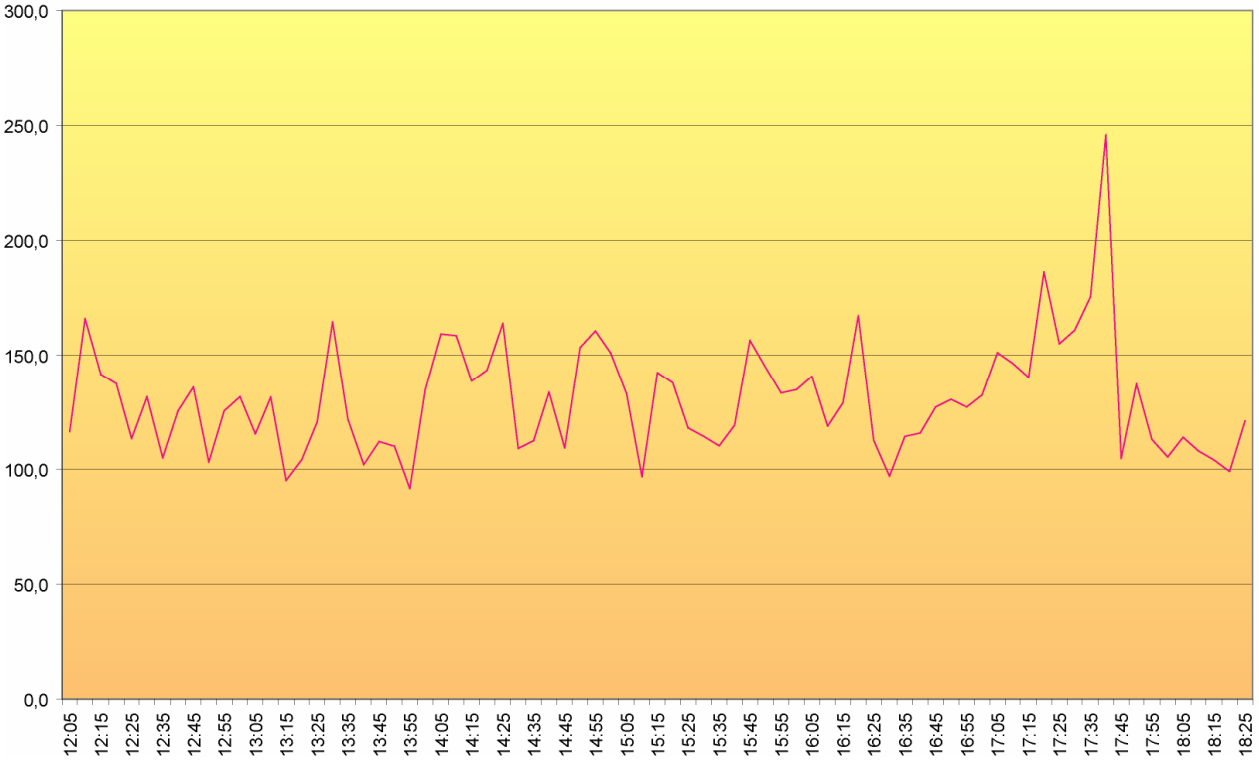


Figure 5.30 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode

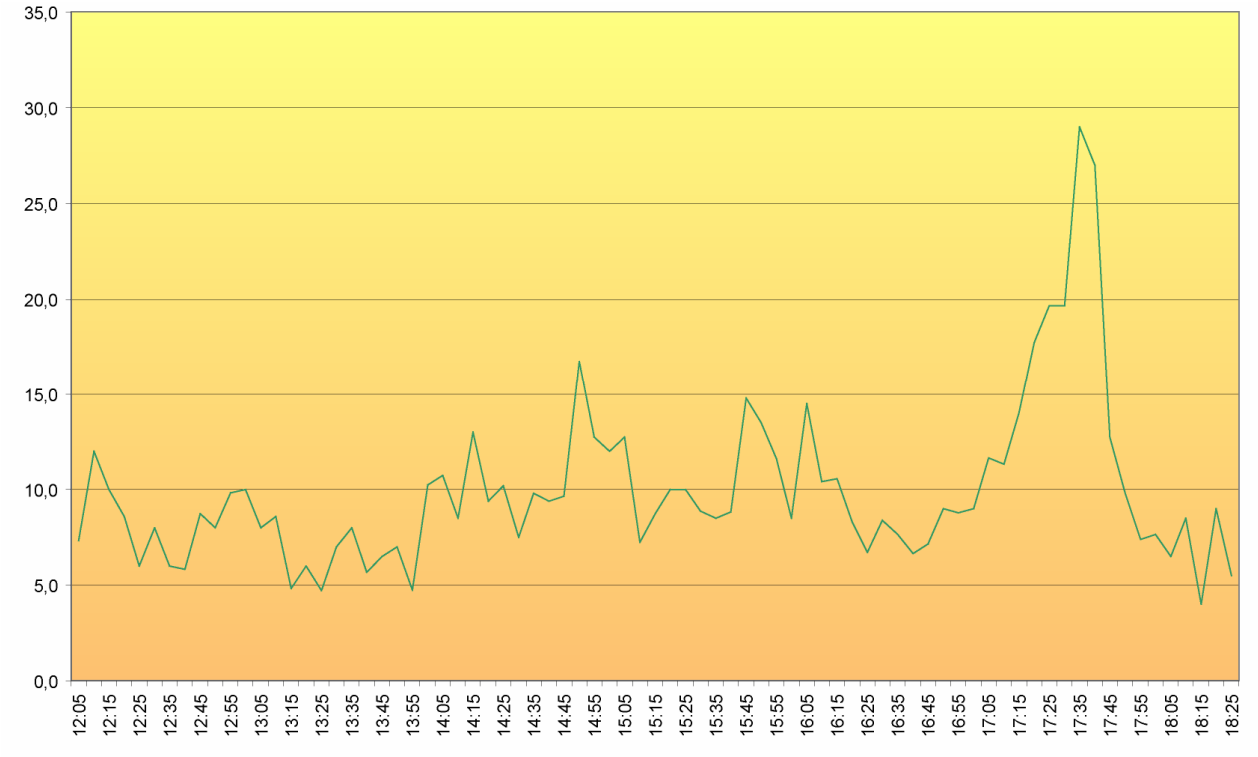


Figure 5.31 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 19 septembre 2002

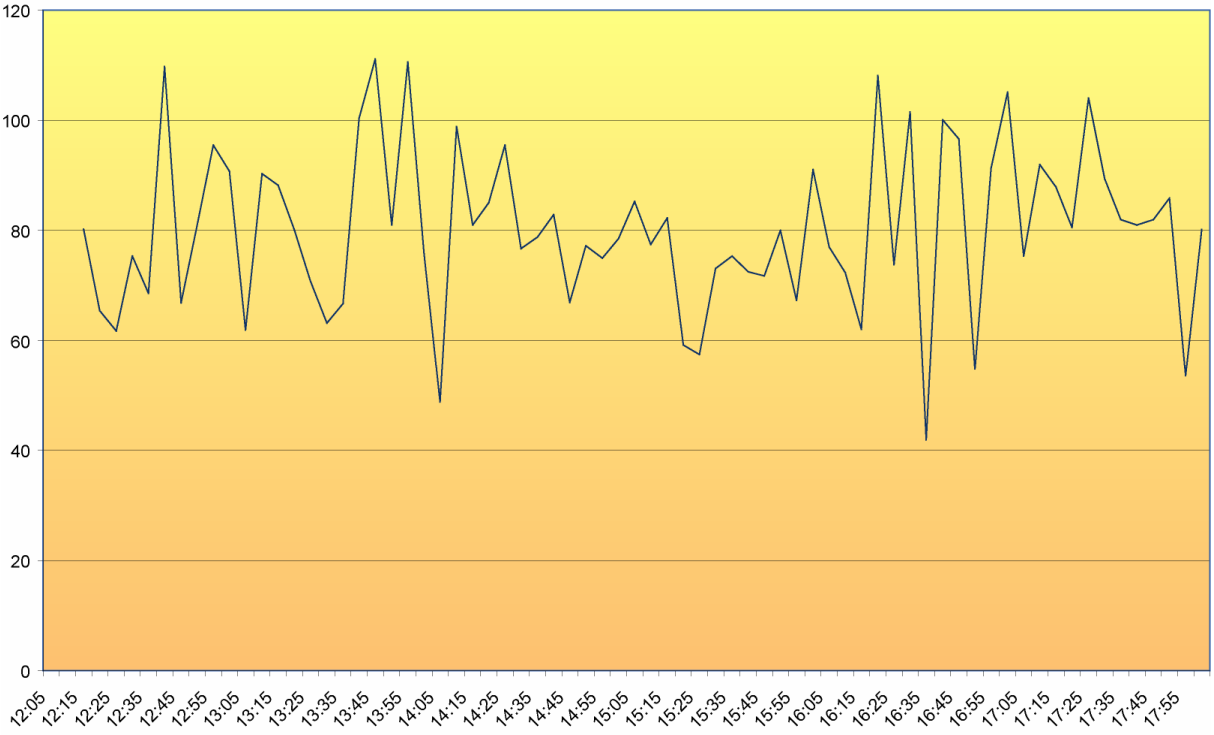


Figure 5.32 : Orientations moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 19 septembre 2002

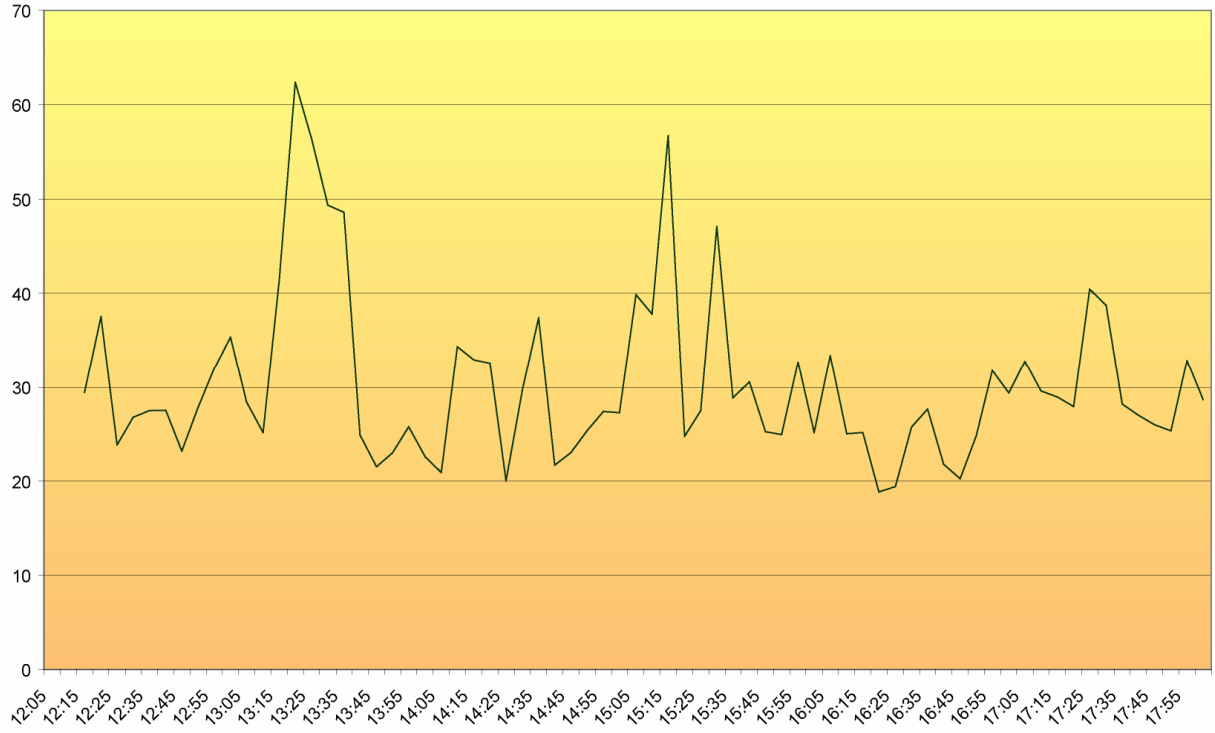


Figure 5.33 : Vitesses moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 19 septembre 2002

2.2.2.3 Relations entre les caractéristiques

Les courbes qui montrent l'évolution de l'intensité maximale et de la superficie des noyaux pluvieux laissaient présager une certaine relation entre ces deux caractéristiques, en adoptant une allure générale très proche (fig. 5.30 et 5.31). En effet, lorsque l'on confronte deux à deux ces caractéristiques, nous obtenons un r^2 significatif de 0,36, qui vient confirmer la relation déjà mise en évidence pour l'épisode du 09 septembre 2002 (fig. 5.34). Pour ce qui est des autres caractéristiques, leurs confrontations deux à deux par nuages de régressions ne montrent pas de relations significatives.

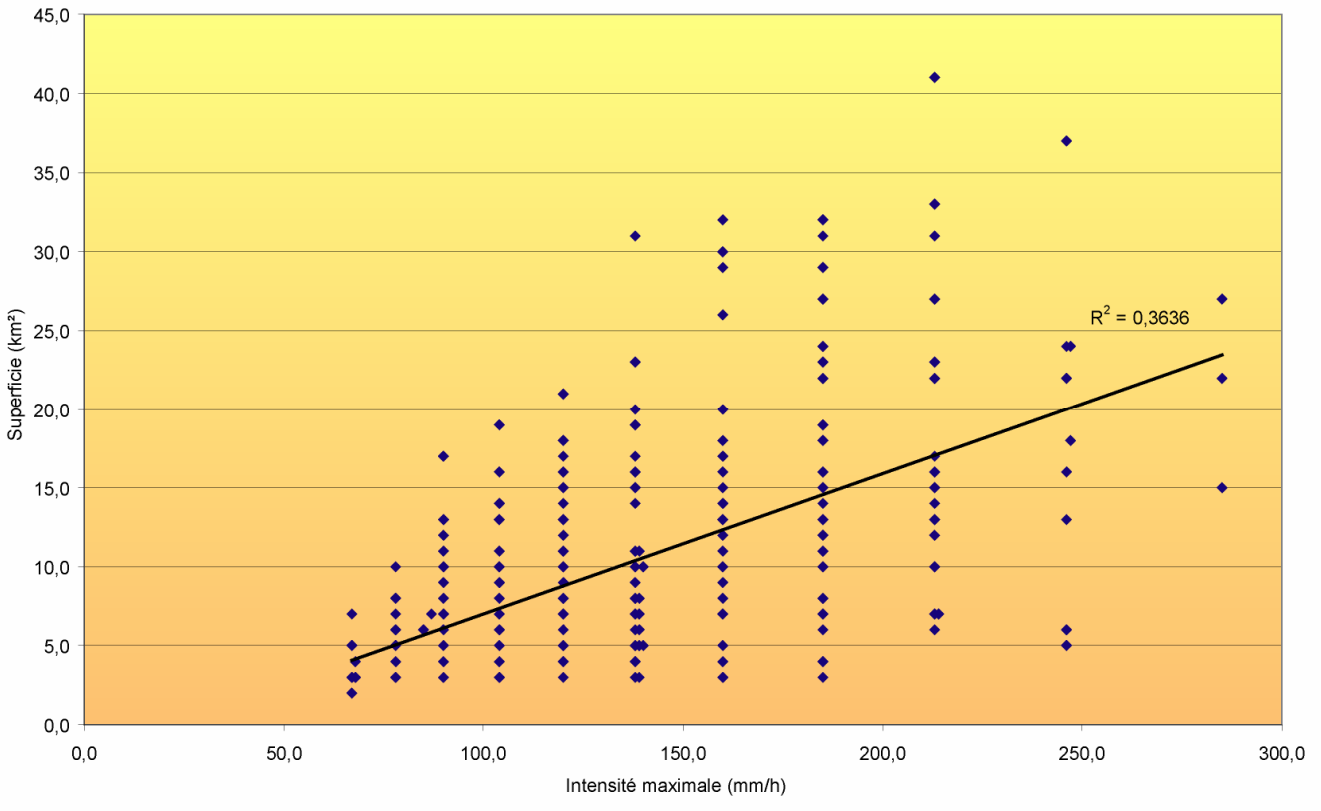


Figure 5.34 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 19 septembre 2002

2.3 Episode du 23 juillet 2004

2.3.1 *Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs*

L'épisode pluvieux du 23 juillet 2004 est le troisième épisode le plus intense en 18 minutes de la période 2001-2005, avec 92 mm/h enregistrés par le réseau de mesure au sol de l'agglomération lyonnaise. En six minutes, cette intensité monte à 154 mm/h. Cet épisode, qui a débuté à 07h06, est le plus court des épisodes remarquablement intenses enregistrés, car il n'a duré qu'une seule heure.

Les noyaux identifiés par la chaîne de traitement se situent majoritairement à l'ouest et au nord du Grand Lyon (fig. 5.35). Encore une fois, le Grand Lyon n'est pas la zone la plus touchée par les noyaux de forte intensité. La disposition de ces noyaux de pluie de forte

intensité laisse présager un déplacement de ces amas selon une direction du sud-ouest au nord-est.

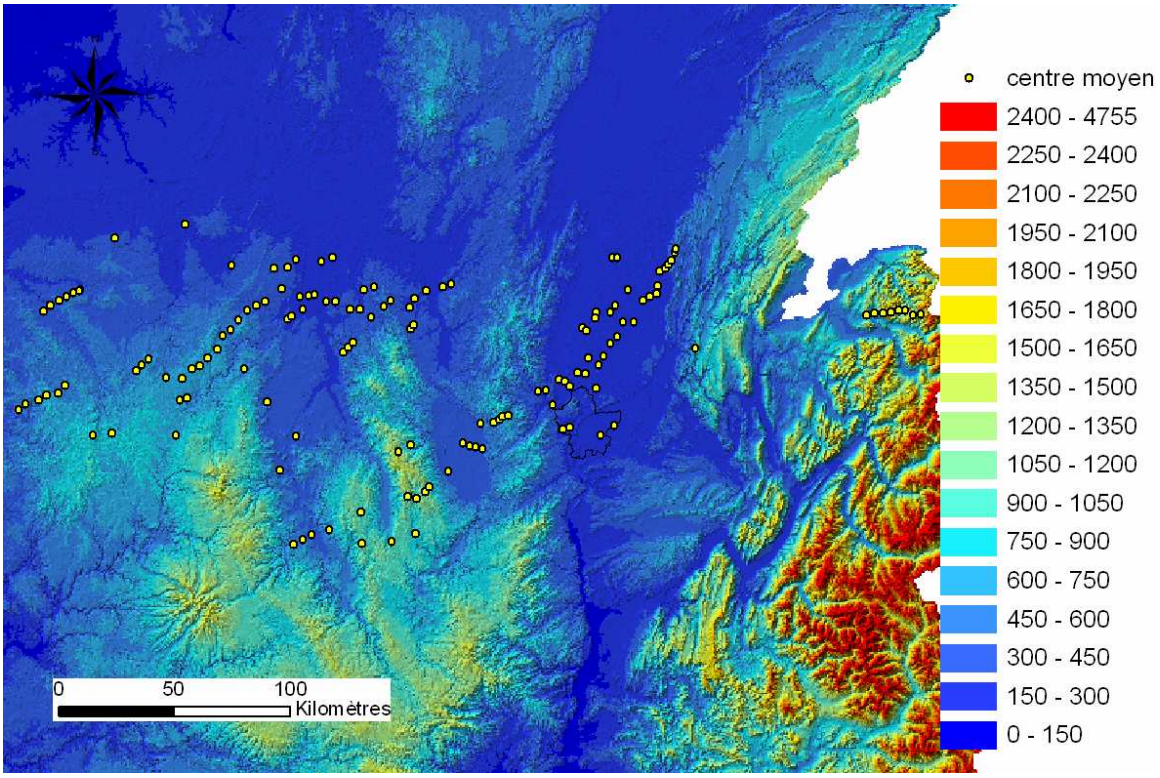


Figure 5.35 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 23 juillet 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

Cette direction est confirmée avec l'analyse des vecteurs de déplacement des noyaux de forte intensité (fig. 5.36). Le déplacement emprunté par les amas est nettement du sud-ouest au nord-est, et ressemble fortement aux trajectoires mises en évidence lors de l'analyse de l'épisode du 09 septembre 2002. L'étude statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité va nous renseigner précisément sur l'orientation suivie par ces noyaux.

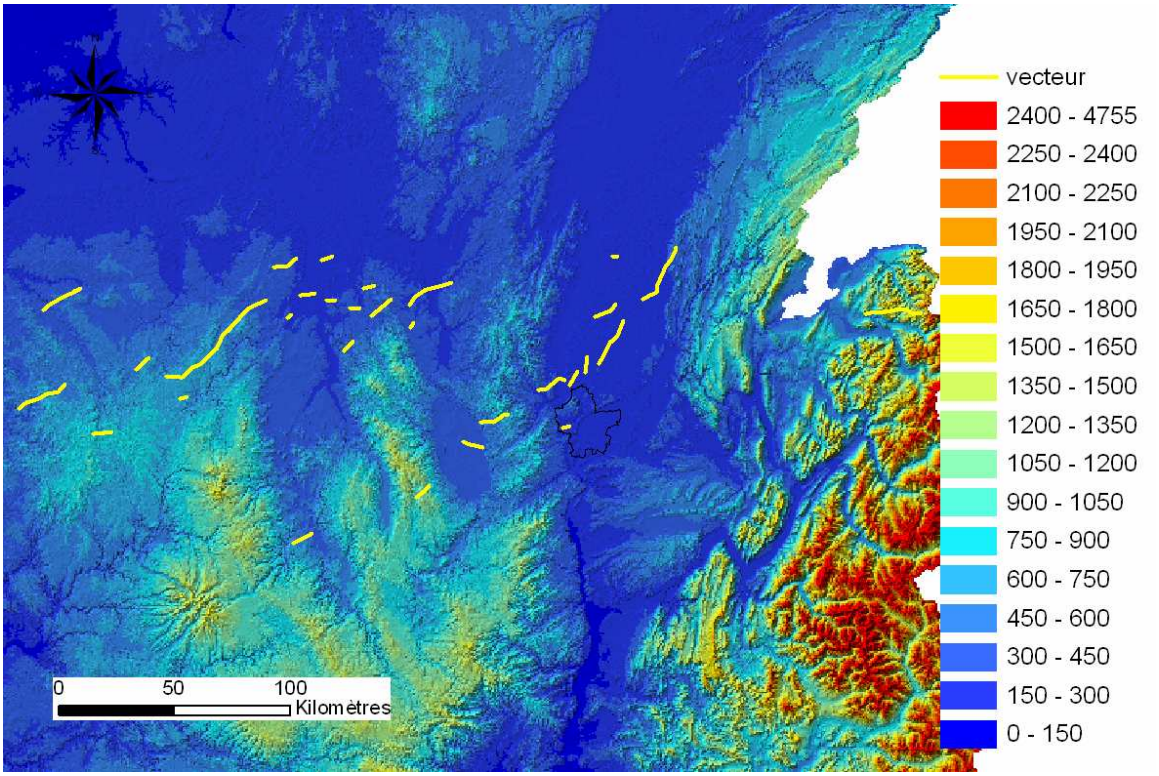


Figure 5.36 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 23 juillet 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

2.3.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité

2.3.2.1 Analyse statistique globale

La chaîne de traitement a identifié 145 noyaux de forte intensité lors de l'épisode pluvieux du 23 juillet 2004. L'intensité maximale relevée est de 597 mm/h, pour une moyenne par noyau de 198 mm/h (tableau 5.4). L'épisode du 23 juillet 2004 est celui qui présente des noyaux de pluie de forte intensité dont la superficie est la plus élevée, avec une moyenne de 45,7 km², mais avec une très forte variabilité. La forme des noyaux est étirée, avec un indice de 2,5, et présente une rotation moyenne de 108,3°N. Sur le Grand Lyon, l'intensité la plus intense relevée est de 164 mm/h, ce qui est relativement proche des 154 mm/h enregistrés avec les pluviomètres.

L'analyse descriptive des trajectoires des noyaux nous avait révélé un déplacement du sud-ouest au nord-est. L'analyse statistique des caractéristiques indique que l'orientation moyenne est de 66,4 °N, avec un écart type considérable, mais une très faible variance

circulaire moyenne. La vitesse moyenne de 50,4 km/h présente un faible écart type de 14,9 km/h. La vitesse la plus élevée enregistrée est de 89,5 km/h, alors que la plus faible est de 22,6 km/h.

	Noyaux par pas de temps	**Intensité maximale** (mm/h)	**Intensité moyenne** (mm/h)	**Aire** (km²)	**Forme**	**Rotation** (°N)	**Orientation** (°N)	**Variance circulaire**	**Vitesse** (km/h)
Moyenne	2,4	198,0	107,2	45,7	2,5	108,3	66,4	0,04	50,4
Écart Type	1,2	96,7	25,4	45,1	0,9	55,4	27,3	0,05	14,9
Maximum	6	597	237	191	5,7	179,1	128,9	0,22	89,5
Minimum	1	80	71	11	1	0,9	6,2	0,00	22,6

Tableau 5.4 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 23 juillet 2004

2.3.2.2 Analyse des caractéristiques au cours du temps

Le nombre de noyaux de forte intensité par pas de temps a varié au cours de l'épisode, avec un pic du nombre d'amas de 05h00 à 06h30, pour suivre avec une diminution de ce nombre vers la fin de l'événement (fig. 5.37).

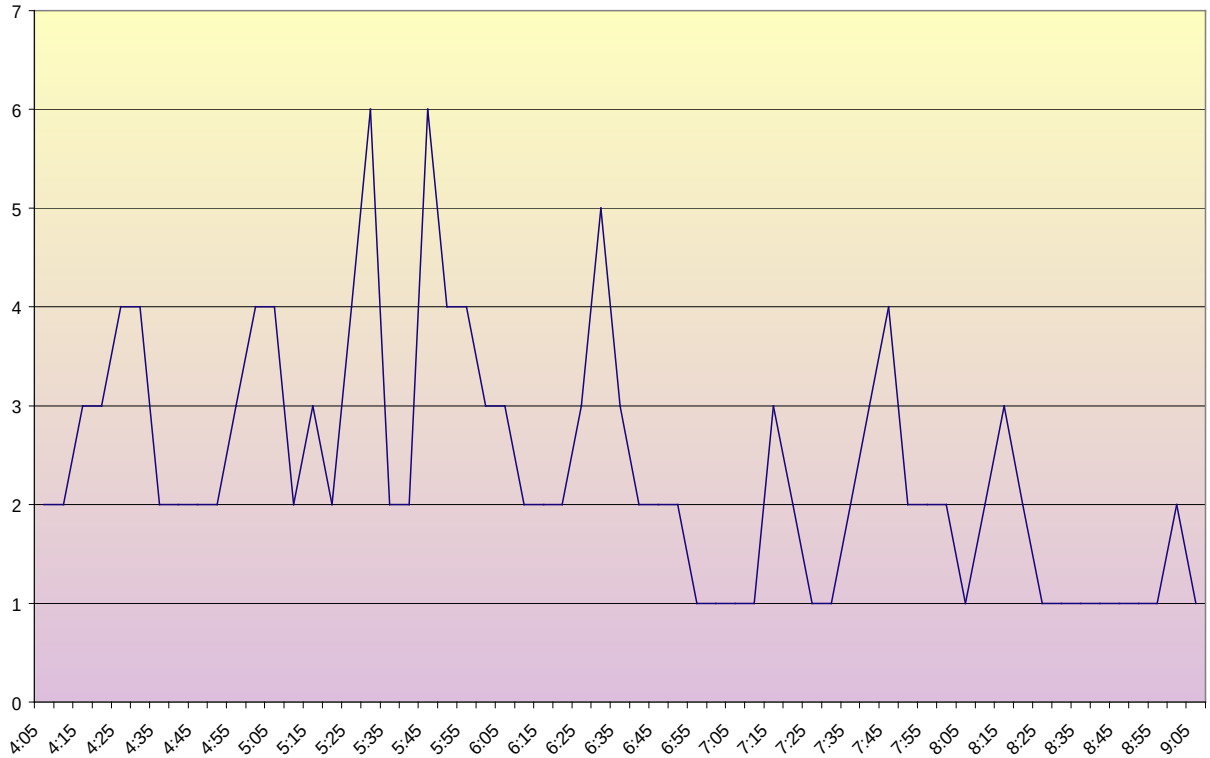


Figure 5.37 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 23 juillet 2004

L'intensité maximale moyenne par pas de temps a été la plus élevée au début de l'épisode, pour connaître par la suite une diminution (fig. 5.38). Cependant, une augmentation de l'intensité a eu lieu de 04h45 à 05h40. La superficie moyenne des noyaux au cours du temps est encore plus variable, avec des brusques augmentations d'aires d'une cinquantaine de km², parfois en quelques minutes (fig. 5.39). Les formes et les rotations des noyaux sont aussi très hétérogènes, avec l'absence de toute tendance globale.

L'étude de l'évolution de l'orientation des noyaux au cours de l'épisode est très intéressante. En effet, du début de l'épisode et jusqu'à 07h00, l'orientation est plutôt constante, et comprise ente 60°N et 80°N. Ensuite, cette caractéristique connaît de fortes fluctuations, avant de diminuer fortement et d'atteindre des valeurs inférieures à 40°N (fig. 5.40). Il en est de même pour la vitesse. Plutôt constante en début d'épisode et comprise entre 40 et 60 km/h, la vitesse connaît de fortes et rapides variations. En effet, à partir de 06h40, celle-ci subit de brusques accélérations ou décélérations, de plusieurs dizaines de kilomètres par heure quelquefois, notamment à 06h55 ou 07h25 (fig. 5.41). Les vitesses à la fin de l'épisode sont beaucoup plus lentes, avec des valeurs inférieures à 40 km/h.

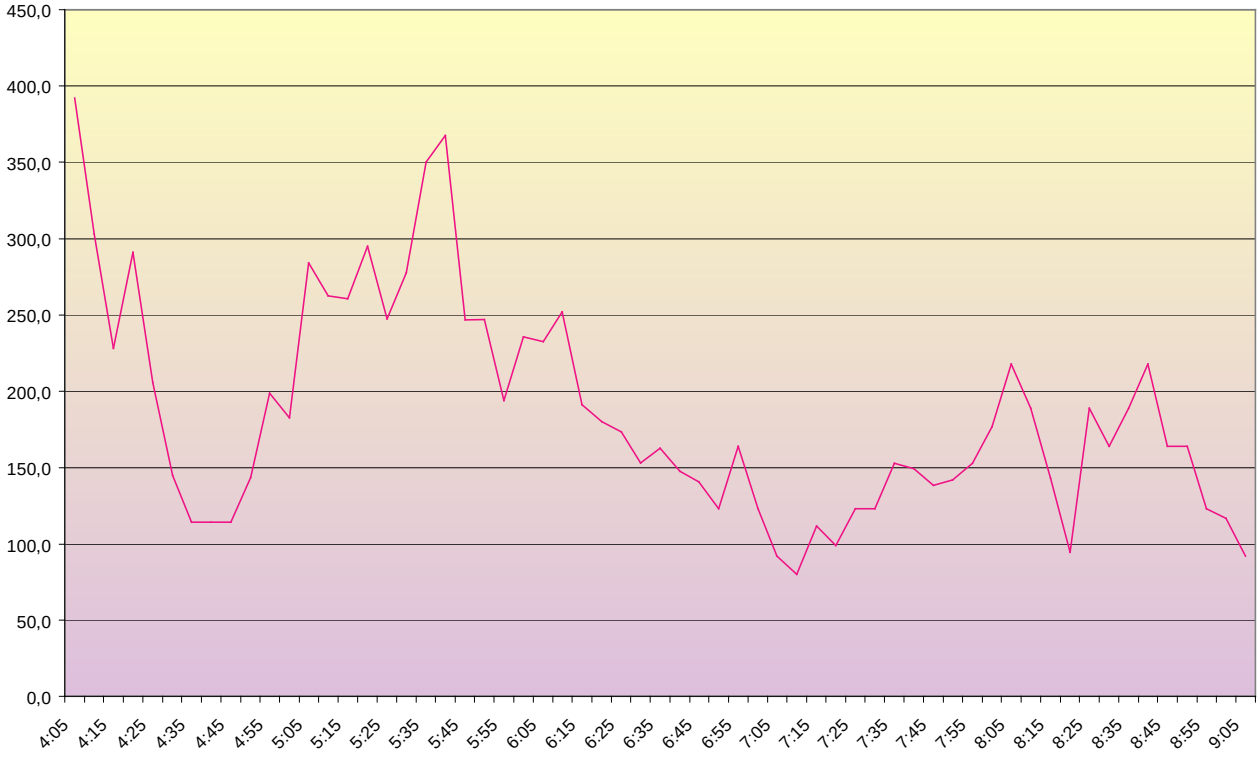


Figure 5.38 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 23 juillet 2004

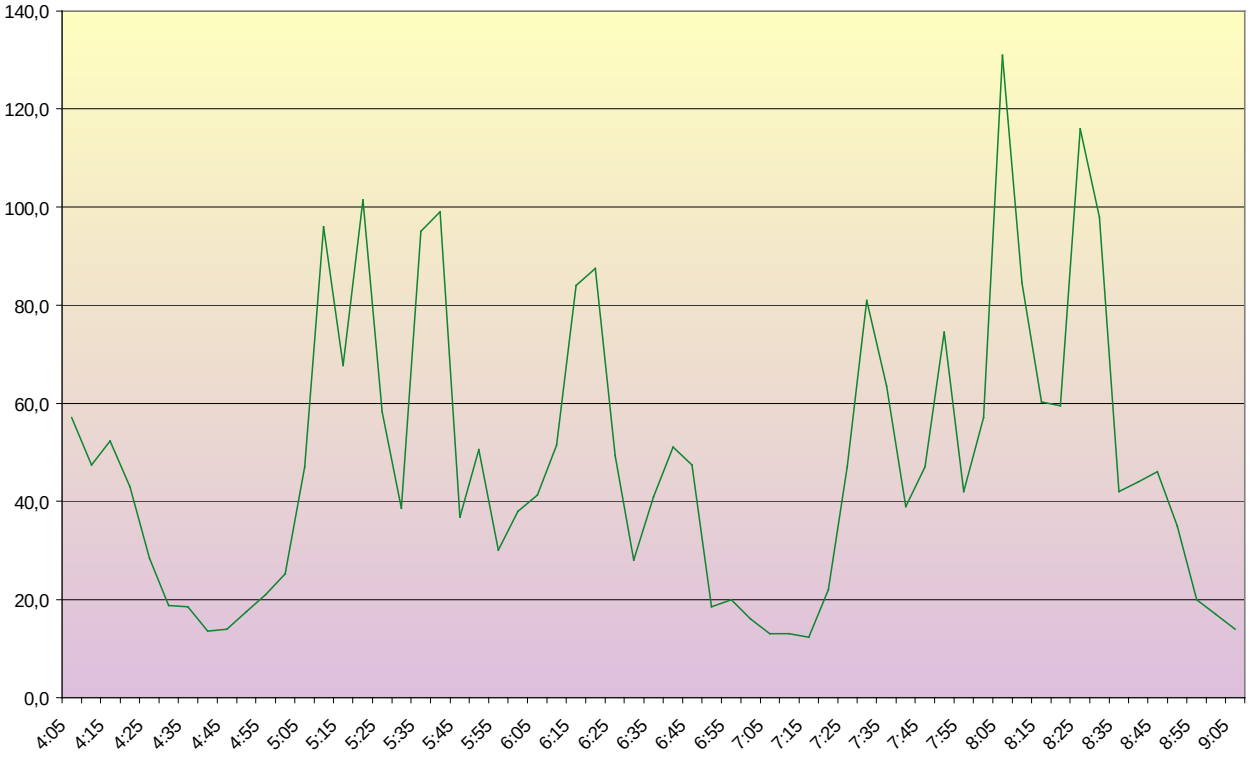


Figure 5.39 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 23 juillet 2004

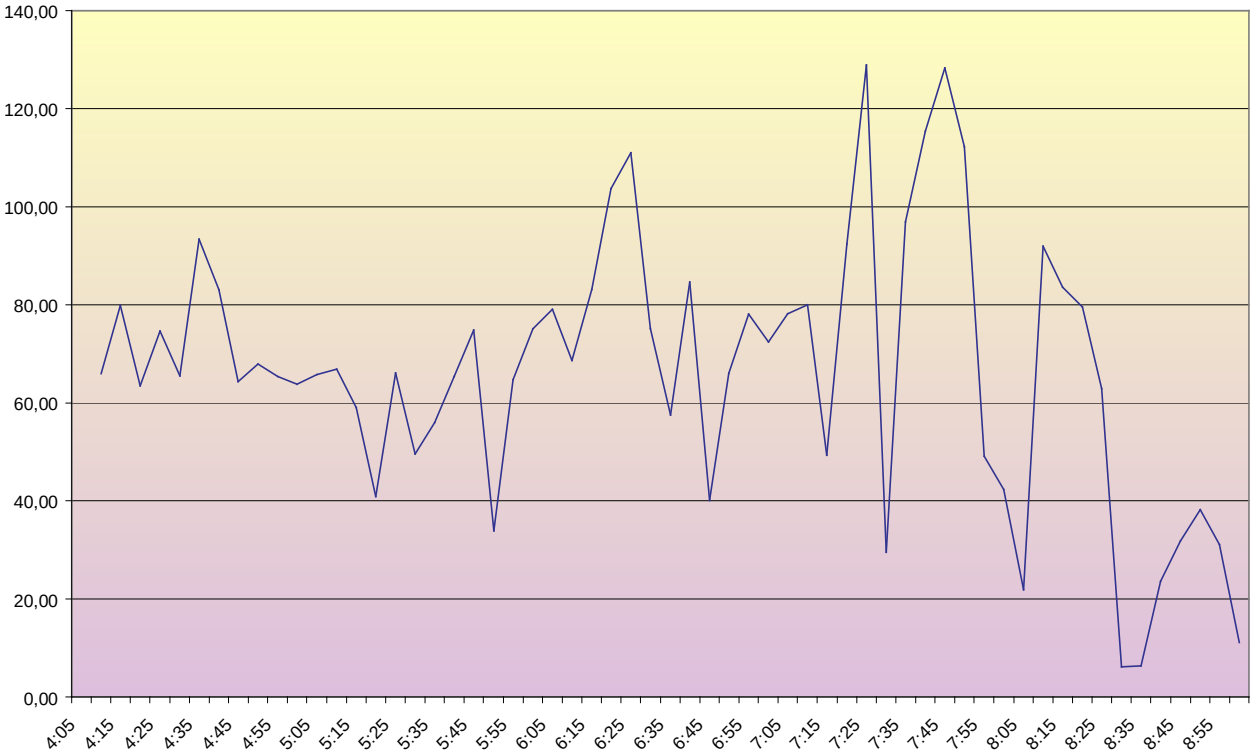


Figure 5.40 : Orientations moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 23 juillet 2004

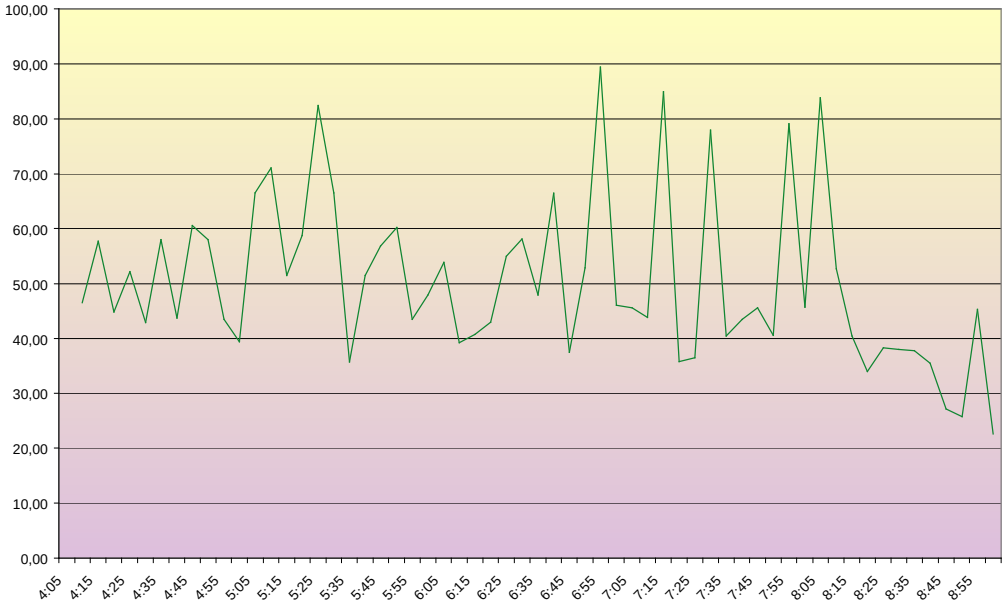


Figure 5.41 : Vitesses moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 23 juillet 2004

2.3.2.3 Relations entre les caractéristiques

Tout comme pour les épisodes précédents, la seule relation qui se manifeste entre les caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité est celle qui unit l'intensité maximale à la superficie des amas identifiés. En effet, dans le cas de cet épisode pluvieux, nous obtenons un coefficient de détermination de 0,37 entre ces deux caractéristiques (fig. 5.42).

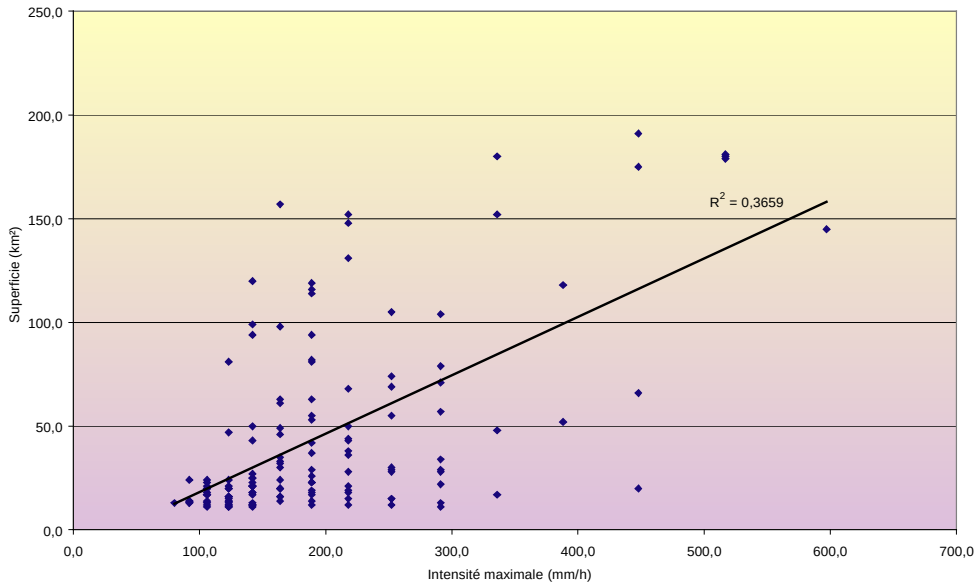


Figure 5.42 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité du 23 juillet 2004

2.4 Episode du 04 août 2004

2.4.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs

L'épisode pluvieux du 04 août 2004 est le deuxième événement le plus intense en 18 minutes de la période 2001-2005 avec une intensité relevée par le réseau pluviométrique de 111,3 mm/h. En six minutes, le réseau de mesure nous indique une intensité maximale de 156 mm/h. Il commence à 17h06 et dure quatre heures.

Les centres moyens pondérés des noyaux de pluie intense identifiés se répartissent le long des vallées du Rhône et de la Saône. Des amas de forte intensité ont aussi été identifiés au nord du Massif central. Le radar de Météo-France situé à Saint-Nizier d'Azergues permet en outre d'identifier quelques dizaines de noyaux de forte intensité sur le territoire suisse (fig. 5.43).

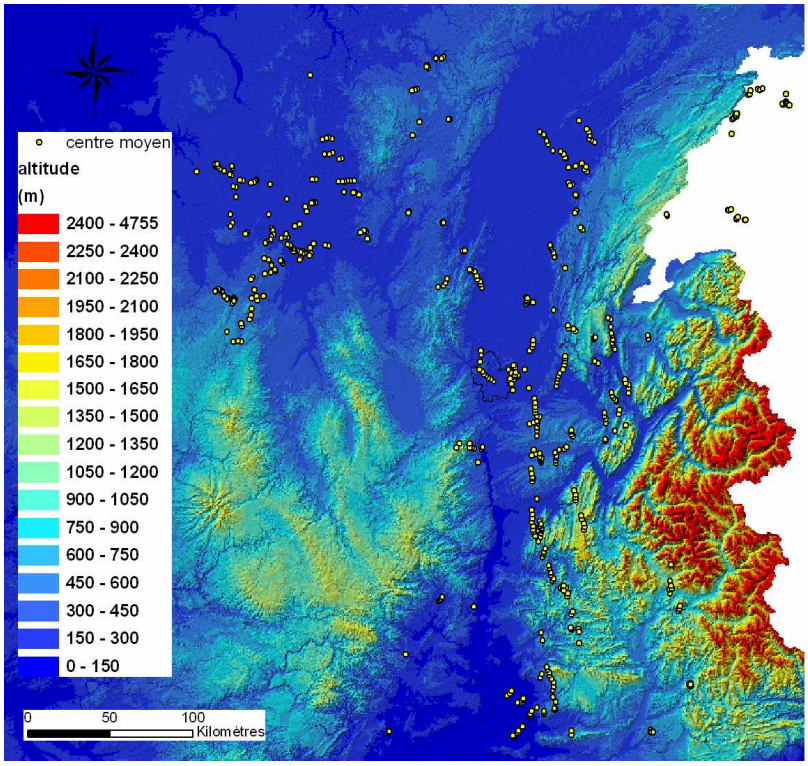


Figure 5.43 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 04 août 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

Cette fois-ci durant cette épisode, le Grand Lyon est touché assez fortement par les noyaux de pluie de forte intensité. En effet, sept noyaux ont été identifiés sur le nord-ouest de l'agglomération, et neuf sur l'est du territoire lyonnais (fig. 5.44).

Contrairement aux épisodes précédents dont les trajectoires des noyaux de pluie de forte intensité adoptaient des trajectoires dirigées du sud-ouest au nord-est (09 septembre 2002 et 23 juillet 2004) ou de l'ouest vers l'est (19 septembre 2002), celles du 04 août 2004 proviennent du sud (fig. 5.45). En effet, la majorité des noyaux ont adopté des trajectoires allant du sud au nord, avec parfois une légère inclinaison vers l'ouest. L'analyse des caractéristiques va permettre d'obtenir des données plus précises sur cette orientation, mais aussi sur l'intensité maximale des noyaux, ou encore sur leur vitesse.

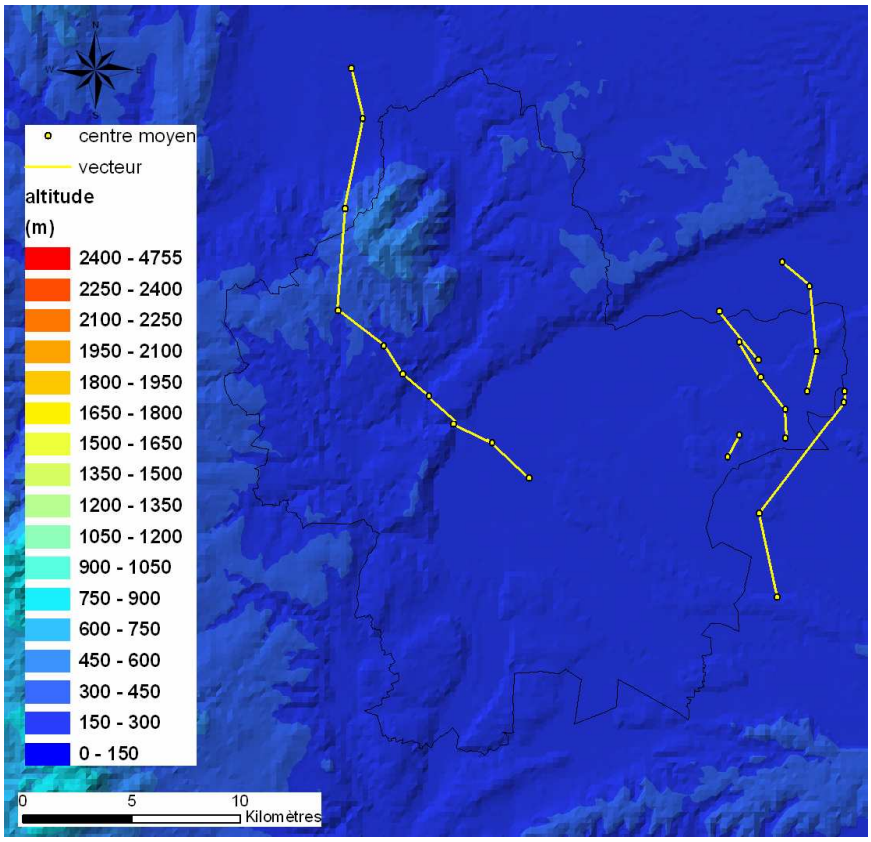


Figure 5.44 : Centres moyens pondérés et vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 04 août 2004 sur le territoire du Grand Lyon

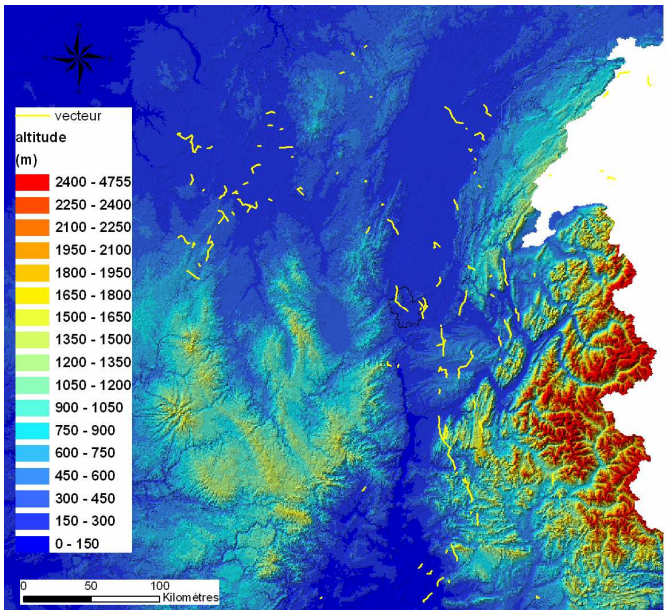


Figure 5.45 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 04 août 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

2.4.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité

2.4.2.1 Analyse statistique globale

L'analyse a permis d'identifier 514 noyaux de forte intensité pluvieuse durant cet épisode. Les amas identifiés par pas de temps sont très nombreux, avec un maximum de 19 entités. L'intensité maximale relevée est de 356 mm/h. Sur le Grand Lyon, elle est de 231 mm/h. Ces intensités ont été enregistrées dans le centre de l'agglomération, mais aussi dans l'est lyonnais. Ces valeurs sont bien supérieures au 156 mm/h en six minutes relevées avec les pluviomètres. L'aire moyenne des noyaux est de 22,4 km², avec un écart type important. L'aire maximale présentée par un des amas identifié est de 106 km². La forme des noyaux est légèrement allongée, avec en moyenne une longueur deux fois supérieure à la largeur, et une rotation moyenne de 83,3 °N.

L'orientation moyenne des vecteurs de déplacement des noyaux est de 234,5°N, mais cette orientation est peu significative étant donné l'écart type considérable de 141,7°N. D'une manière générale, les noyaux remontent du sud vers le nord et leur orientation oscille autour de 0°N, ce qui explique ce fort écart type. La vitesse moyenne des noyaux est très faible, avec 25,6 km/h. Il s'agit de la vitesse moyenne la plus faible des épisodes de la période.

Cette faible vitesse explique vraisemblablement que cet épisode présente des trajectoires de noyaux beaucoup moins linéaires que les autres épisodes traités. L'écart type est aussi faible, avec seulement 7,3 km/h, et la vitesse minimale est très réduite, avec seulement 8,5 km/h.

	Noyaux par pas de temps	**Intensité maximale** (mm/h)	**Intensité moyenne** (mm/h)	**Aire** (km²)	**Forme**	**Rotation** (°N)	**Orientation** (°N)	**Variance circulaire**	**Vitesse** (km/h)
Moyenne	6,1	149,1	92,7	22,4	2	83,3	234,5	0,3	25,6
Écart Type	4,3	52,6	34,4	18,4	0,8	34	141,7	0,3	7,3
Maximum	19	356,0	164	106	4,7	175,7	359,4	0,9	43,6
Minimum	1	63,0	63	4	1	26,9	1,1	0	8,5

Tableau 5.5 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 04 août 2004

2.4.2.2 Analyse des caractéristiques au cours du temps

Le nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 04 août 2004 a été important dès le début de l'épisode, avec une dizaine d'entités par pas de temps (fig. 5.46). Par la suite, le nombre de noyaux n'a cessé de croître, jusqu'à atteindre 19 amas à 15h30. Il s'en est alors suivi une baisse constante jusqu'à la fin de l'épisode pluvieux.

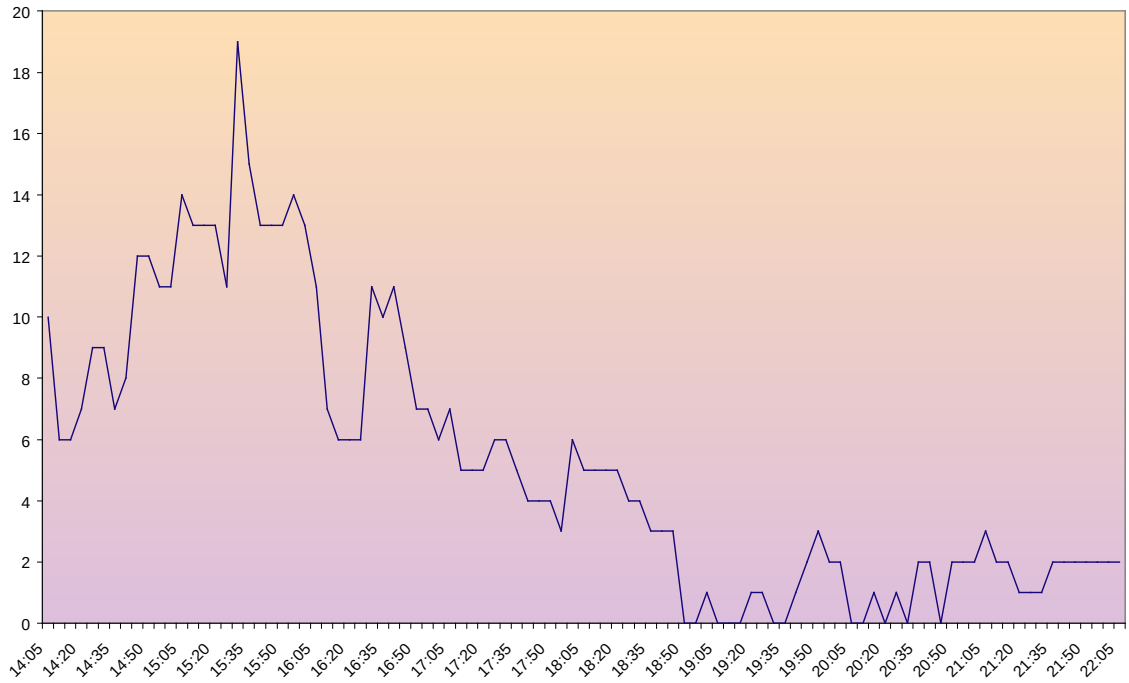


Figure 5.46 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 04 août 2004

En moyenne par pas de temps de cinq minutes, l'intensité maximale des noyaux est restée relativement constante et comprise entre 120 et 180 mm/h, sauf de 19h20 à 20h40, où une baisse de l'intensité est apparue (fig. 5.47).

Il n'en est pas de même pour la superficie moyenne des noyaux, qui varie brusquement d'un pas de temps à l'autre, avec des augmentations ou des diminutions de taille très significatives (fig. 5.48). La vitesse varie aussi autour de 25 km/h, notamment à 14h40 avec un ralentissement à 8,5 km/h, et à la fin de l'épisode à 18h20 avec une accélération à 43,6 km/h (fig. 5.49).

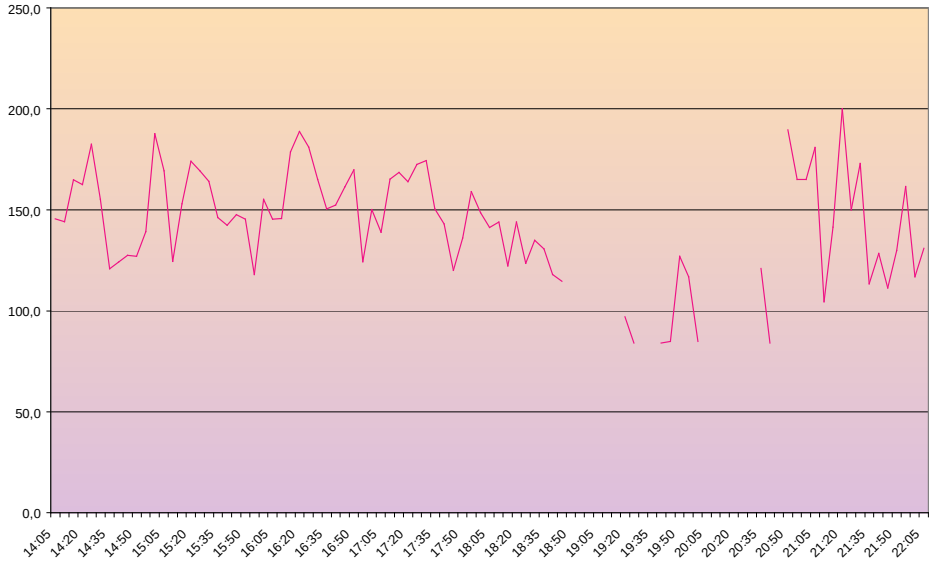


Figure 5.47 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 04 août 2004

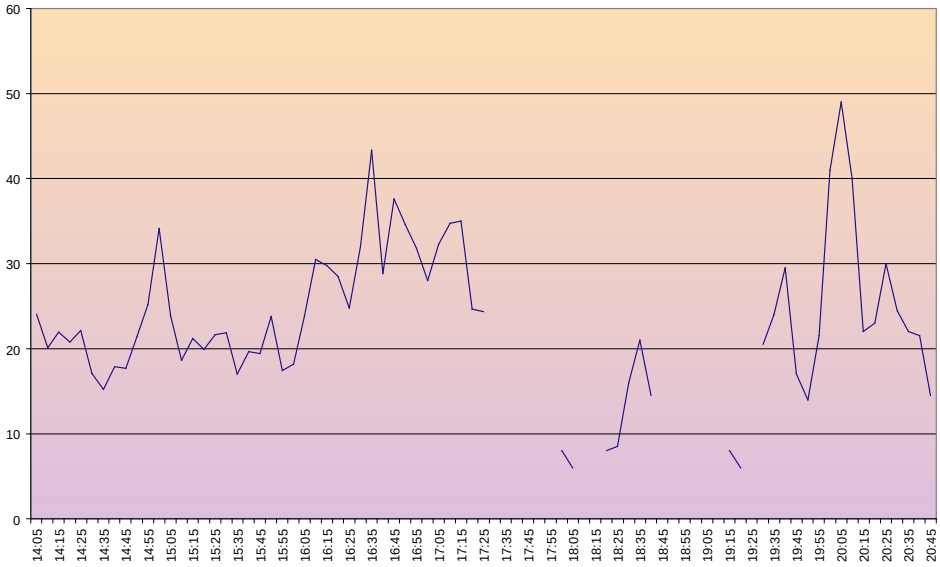


Figure 5.48 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 04 août 2004

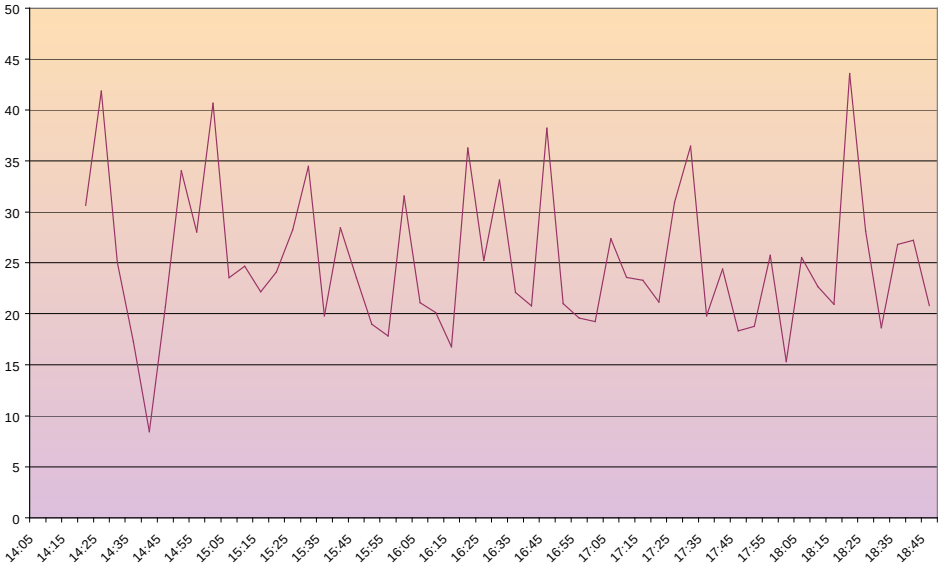


Figure 5.49 : Vitesses moyennes (km/h) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 04 août 2004

2.4.2.3 Relations entre les caractéristiques

L'épisode pluvieux du 04 août 2004 est l'événement où la relation entre l'intensité maximale des noyaux et leur superficie se manifeste le moins, avec un coefficient de détermination de 0,16 seulement (fig. 5.50). Pour la première fois, ce coefficient de détermination est inférieur à 0,25. Ce dernier sera-t-il plus élevé pour l'événement du 29 juillet 2005, dernier épisode pluvieux de notre échantillon de la période 2001-2005 ?

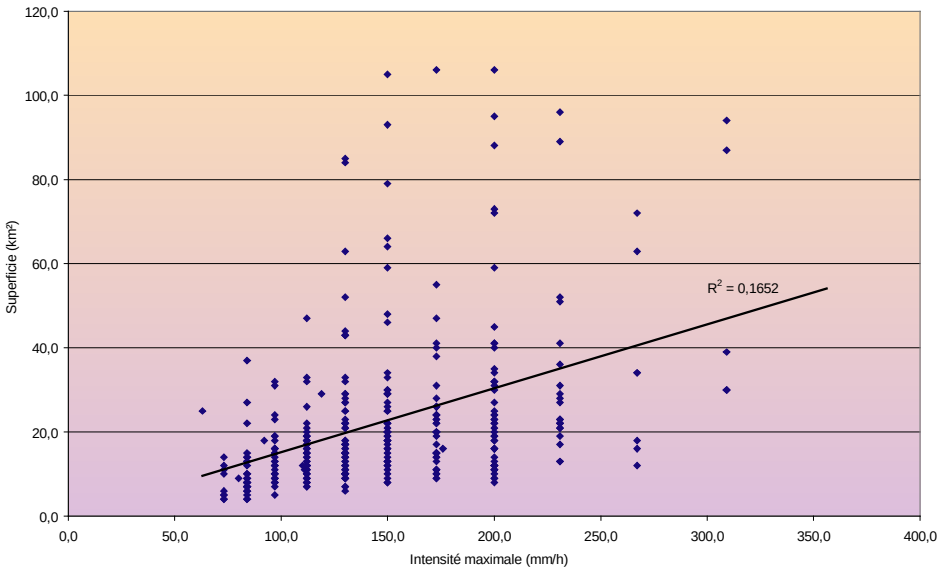


Figure 5.50 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 04 août 2004

2.5 Episode du 29 juillet 2005

2.5.1 *Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs*

L'épisode pluvieux du 29 juillet 2005 est le cinquième épisode le plus intense en 18 minutes de la période 2001-2005, avec une intensité enregistrée par les pluviomètres de 87,3 mm/h. L'intensité maximale relevée en six minutes est de 174 mm/h. Il débute à 12h30 et a duré 11h12.

Les noyaux de pluie de forte intensité se répartissent sur l'ensemble de la couverture du radar météorologique de Saint-Nizier d'Azergues (fig. 5.51). Un grand nombre d'entités est même enregistré au-dessus du territoire helvétique et italien.

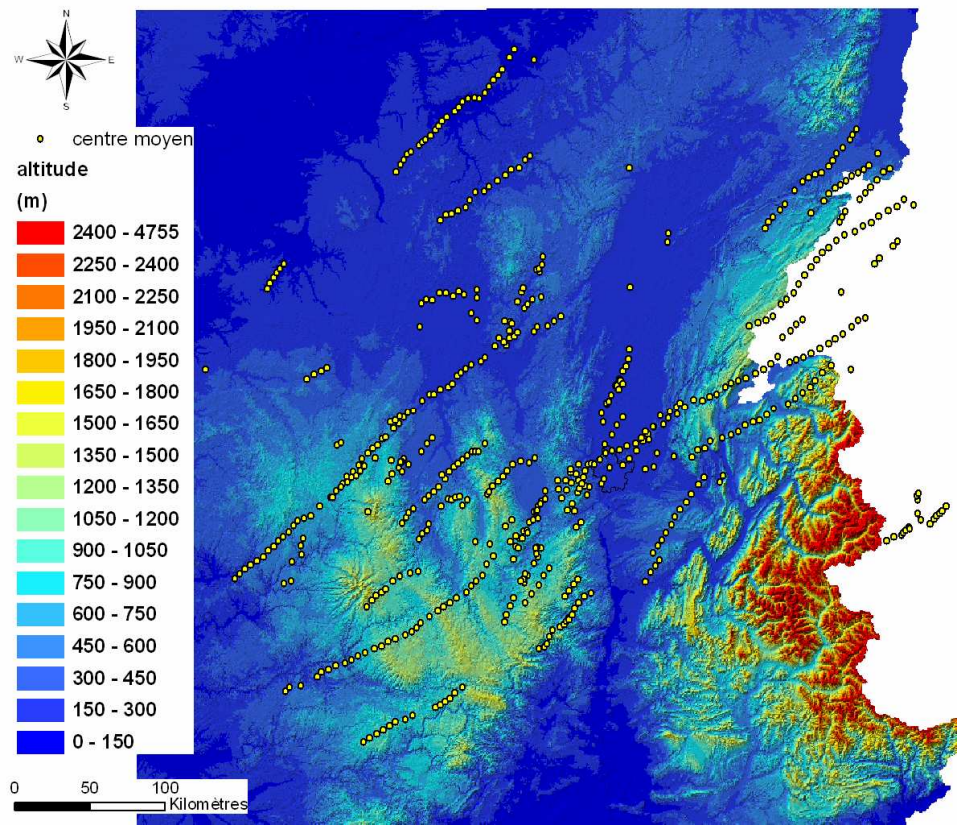


Figure 5.51 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 29 juillet 2005 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

Les centres moyens pondérés sont distribués d'une manière extrêmement rectiligne, suivant une orientation globale de 45°N qui sera affinée par la suite lors de l'étude statistique des caractéristiques. Encore une fois, le Grand Lyon n'est pas la zone la plus touchée. Cependant, nous pouvons constater que des noyaux intenses ont été identifiés dans le centre de l'agglomération, au nord-ouest ainsi qu'à l'est (fig. 5.52).

Comme pressenti lors de l'analyse de la distribution des centres moyens pondérés, les vecteurs de déplacement suivent en effet une trajectoire du sud-ouest au nord-est. Certaines de ces trajectoires sont extrêmement intéressantes. En effet, il peut être constaté que beaucoup d'entres elles adoptent une trajectoire perpendiculaire aux crêtes du Massif central (fig. 5.53).

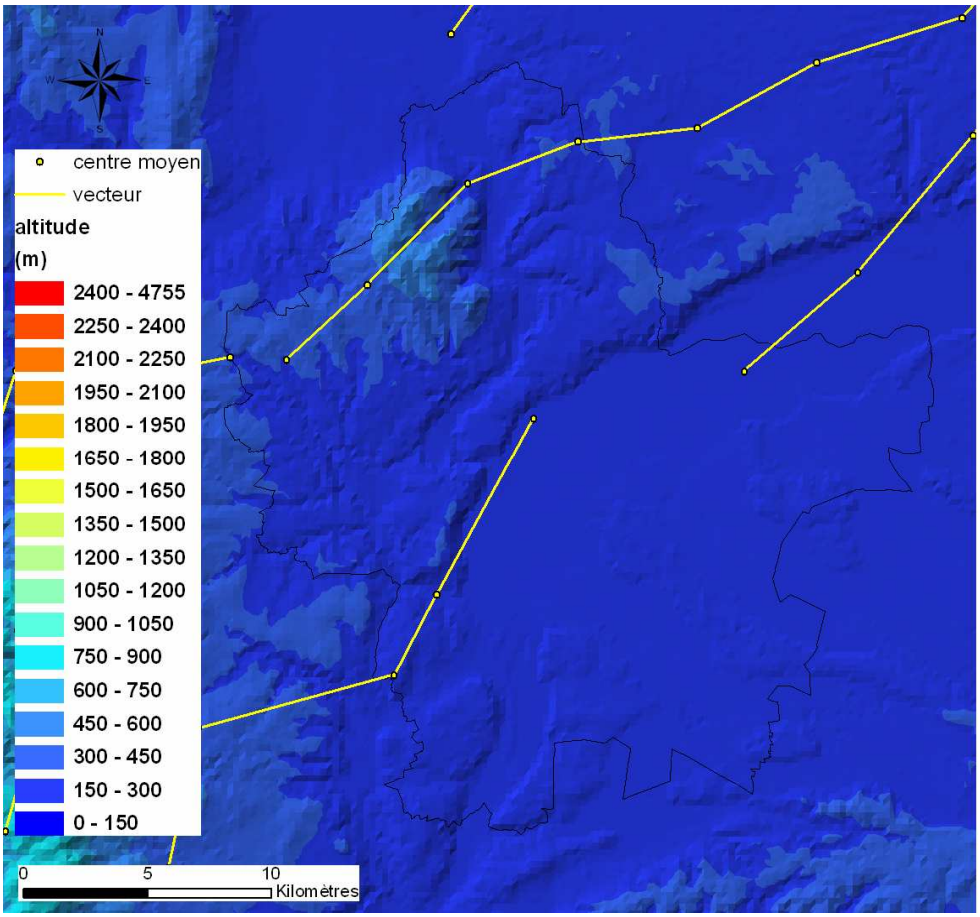


Figure 5.52 : Centres moyens pondérés et vecteur de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 29 juillet 2005 sur le Grand Lyon

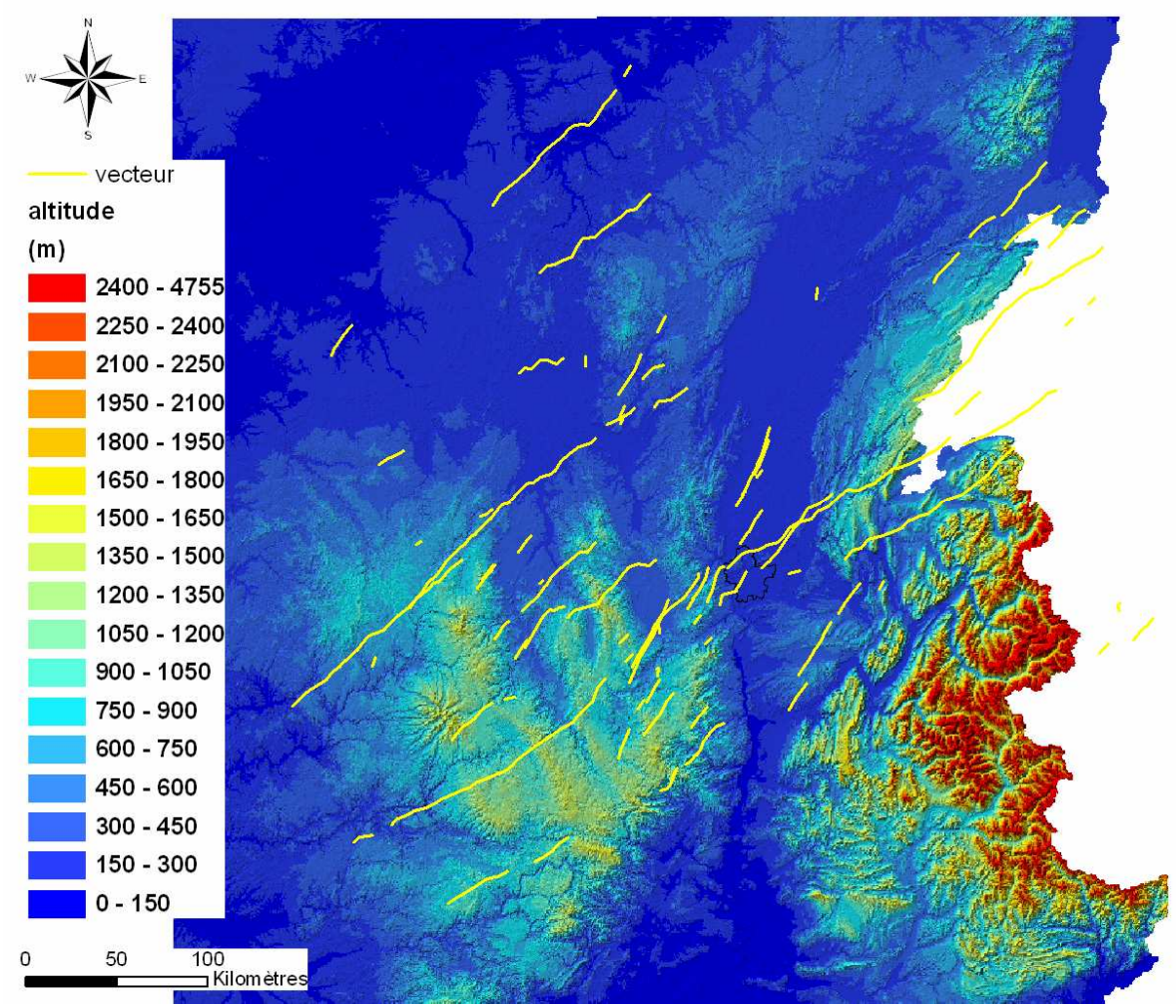


Figure 5.53 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 29 juillet 2005 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

2.5.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité

2.5.2.1 Analyse statistique globale

La procédure d'identification des noyaux de pluie intense a mis en évidence 564 entités, ce qui donne une moyenne de 4,7 amas de pixels par pas de temps (tableau 5.6). En moyenne, ces noyaux présentaient une intensité maximale de 168,5 mm/h. Cependant, l'intensité la plus forte enregistrée a été de 408 mm/h. Cette intensité qui a été enregistrée quatre fois se situe au sud-ouest du Massif central. Sur le Grand Lyon, l'intensité maximale relevée a été de 129 mm/h. Nous pouvons nous interroger sur la relative faible valeur de

cette intensité, car le réseau de mesure au sol, quant à lui, a enregistré une intensité de 174 mm/h sur le territoire du Grand Lyon.

Les noyaux ont présenté des formes plutôt arrondies d'une manière générale, avec un coefficient moyen de 1,4, mais une superficie élevée, avec 39,9 km² en moyenne. Les noyaux ont emprunté une trajectoire du sud-ouest au nord-est, avec une orientation de 47,3°N, et un très faible écart type de 10,9°N. La variance circulaire est elle aussi très faible, comme à son habitude, et à l'inverse de la vitesse. En effet, la vitesse moyenne s'avère très élevée, avec 66,5 km/h. En outre, l'écart type est faible, avec 12,1 km/h. La vitesse minimale enregistrée reste très élevée (43,3 km/h), tout comme la vitesse maximale avec une pointe impressionnante à 105,3 km/h.

	Noyaux par pas de temps	**Intensité maximale** (mm/h)	**Intensité moyenne** (mm/h)	**Aire** (km²)	**Forme**	**Rotation** (°N)	**Orientation** (°N)	**Variance circulaire**	**Vitesse** (km/h)
Moyenne	4,7	168,5	95,3	39,9	1,4	97,2	47,3	0,05	66,5
Écart Type	2,0	71,7	20,7	30,8	1	35,9	10,9	0,08	12,1
Maximum	10,0	408	198	190	5,3	170	74,9	0,47	105,3
Minimum	2,0	63	63	4	0,2	15,7	22,4	0	43,3

Tableau 5.6 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005

2.5.2.2 Analyse des caractéristiques au cours du temps

Le nombre de noyaux, faible au début avec en moyenne deux à trois entités par pas de temps, a connu un accroissement net au milieu de l'épisode, de 12h45 à 16h20, avec six amas environ. Ensuite, les noyaux se font de plus en plus rares jusqu'à la fin de l'épisode (fig. 5.54).

En moyenne, par pas de temps de cinq minutes, l'intensité maximale connaît de fortes variations tout au long de l'épisode. L'intensité la plus faible est à 10h45 avec 92 mm/h, et la plus forte à 15h10 avec 353 mm/h. La fin de l'épisode connaît une élévation de l'intensité durant une heure et demie environ, avec des pics dépassant les 250 mm/h (fig. 5.55).

La courbe représentative de la superficie moyenne des noyaux par pas de temps présente la même allure générale que celle des intensités maximales. On retrouve notamment la diminution de la superficie à 10h45, puis l'augmentation de cette dernière en fin d'épisode (fig. 5.56).

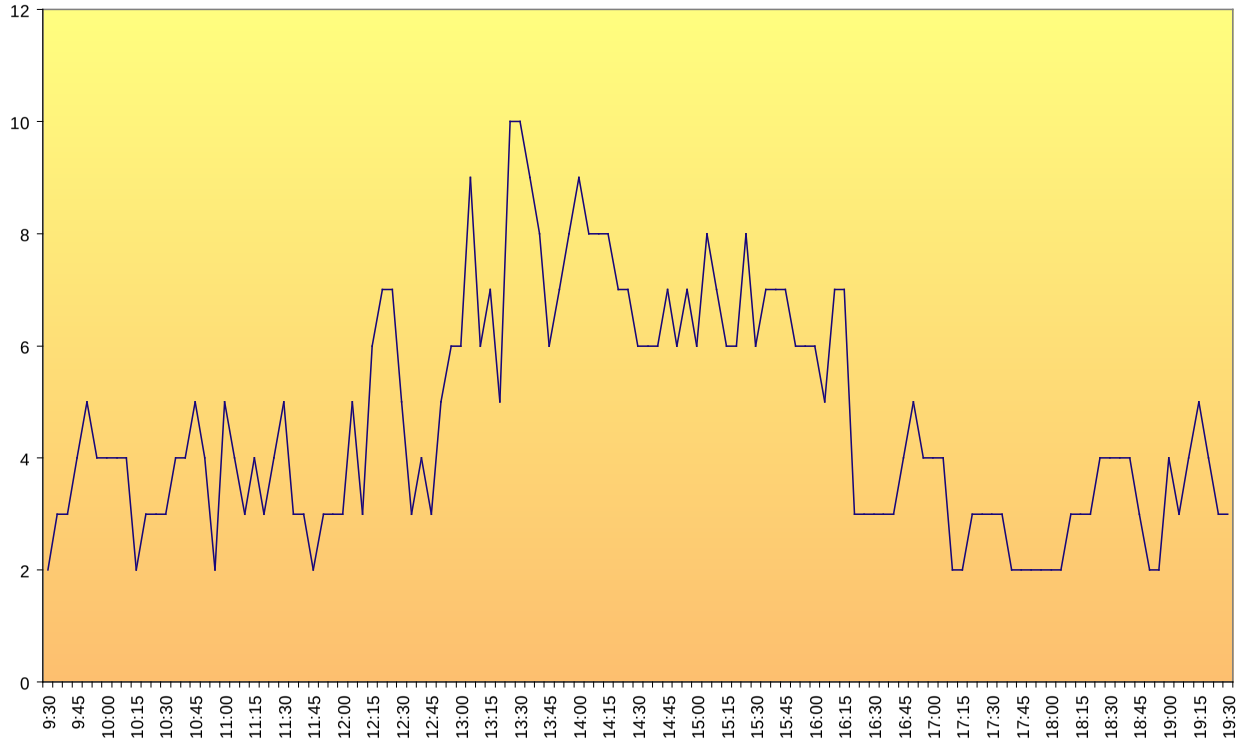


Figure 5.54 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 29 juillet 2005

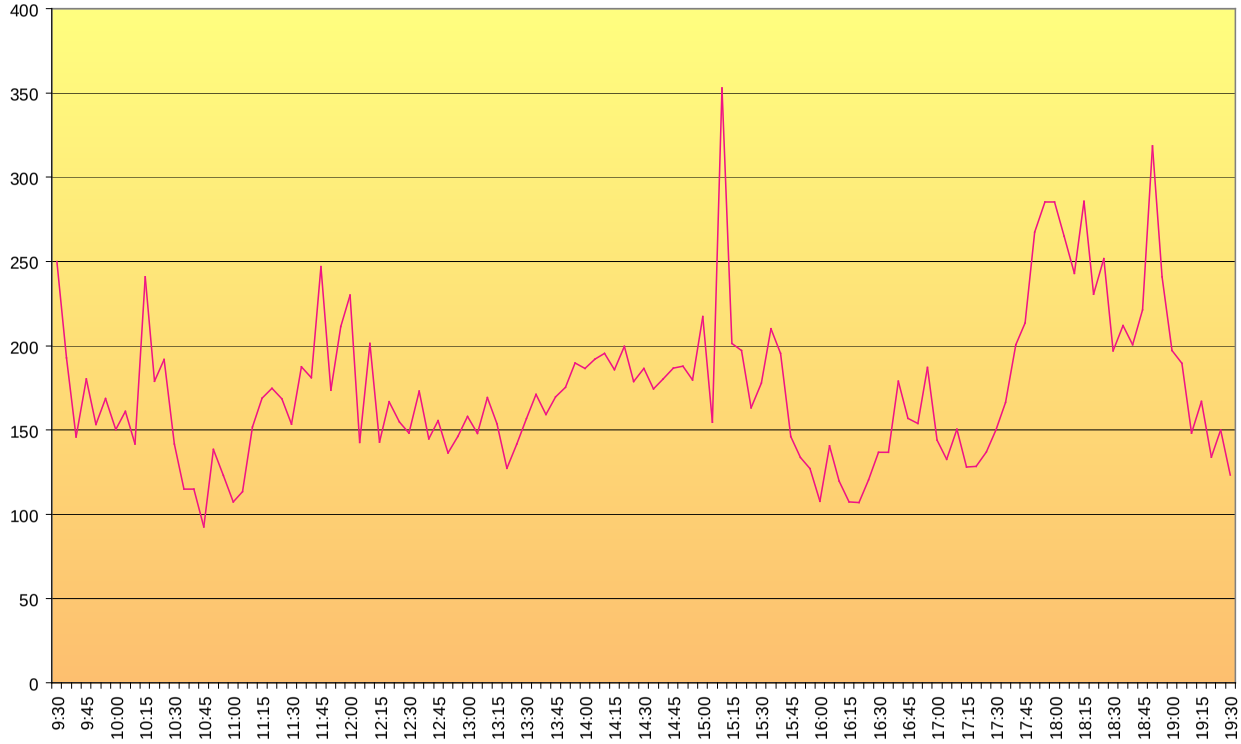


Figure 5.55 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 29 juillet 2005

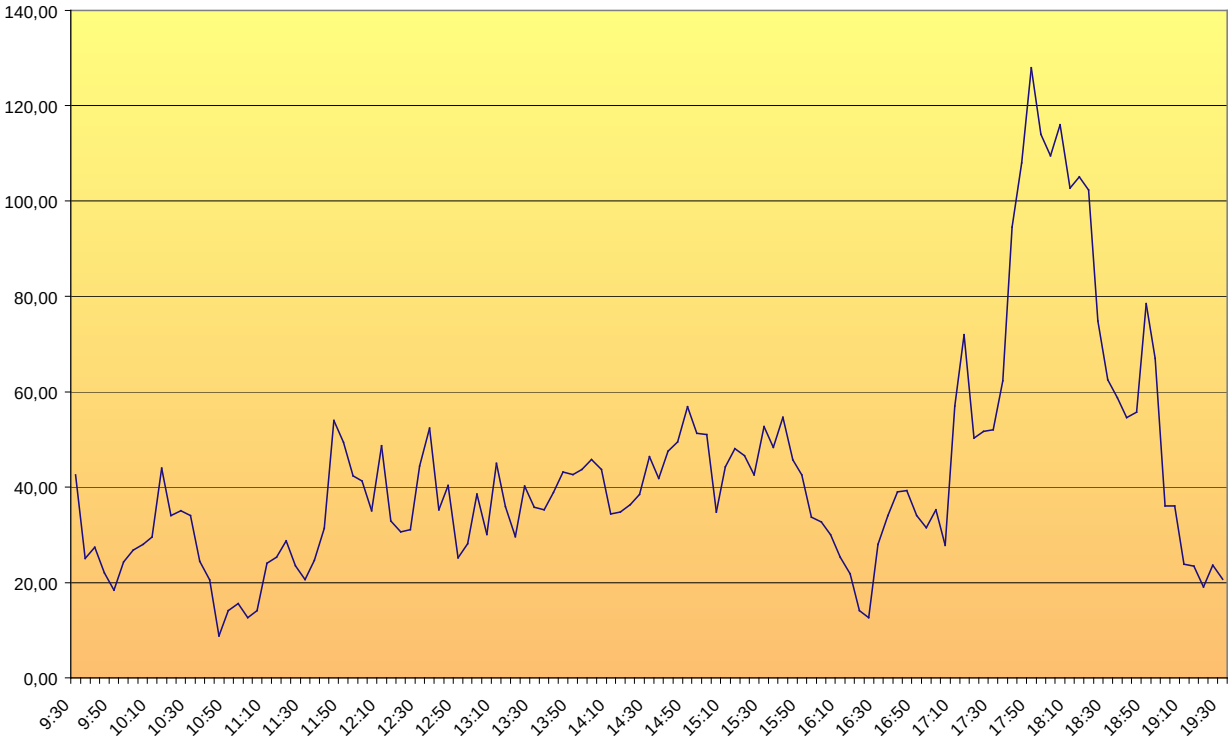


Figure 5.56 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 29 juillet 2005

D'une manière globale, l'orientation moyenne par pas de temps de cinq minutes successifs a connu une augmentation constante tout au long de l'épisode pluvieux, sauf en toute fin d'événement. En effet, de 09h30 à 18h30, l'orientation passe de 35°N à 65°N, avant de chuter et de repasser sous le seuil des 40°N (fig. 5.57).

La vitesse est relativement constante tout au long de l'épisode, et comprise entre 60 et 80 km/h, sauf en fin d'épisode où elle chute à 45 km/h. Il convient toutefois de remarquer une diminution de la vitesse, de 11h00 à 13h10, où cette dernière présente des valeurs fréquemment inférieures à 60 km/h (fig. 5.58).

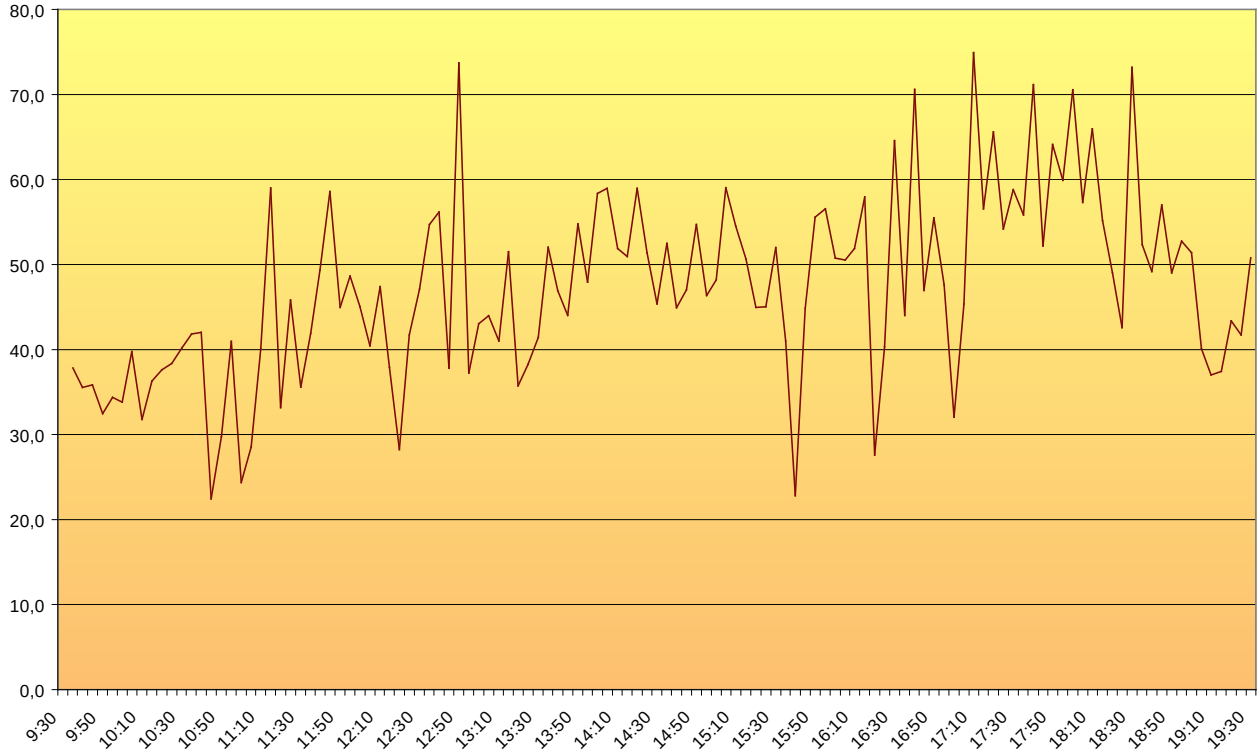


Figure 5.57 : Orientations moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 29 juillet 2005

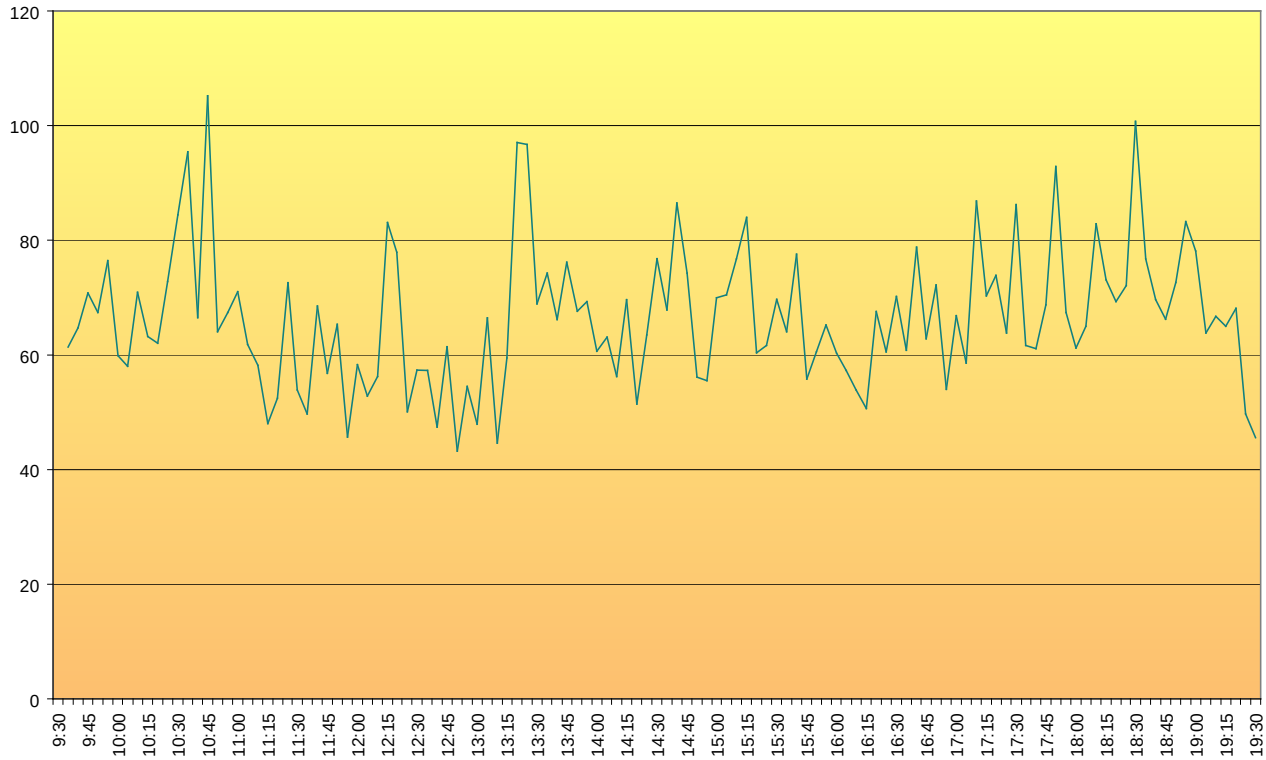


Figure 5.58 : Vitesses moyennes (km/h) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 29 juillet 2005

2.5.2.3 Relations entre les caractéristiques

L'allure générale des courbes de l'évolution des moyennes par pas de temps de l'intensité maximale et de la superficie des noyaux de forte intensité le laissait présager, nous obtenons en effet un coefficient de détermination très significatif entre ces deux caractéristiques. Ce dernier, de 0,4, est le coefficient le plus élevé de ceux trouvés auparavant lors de l'analyse des autres épisodes pluvieux de l'échantillon (fig. 5.59). Concernant les autres caractéristiques, aucune relation significative ne se dégage réellement.

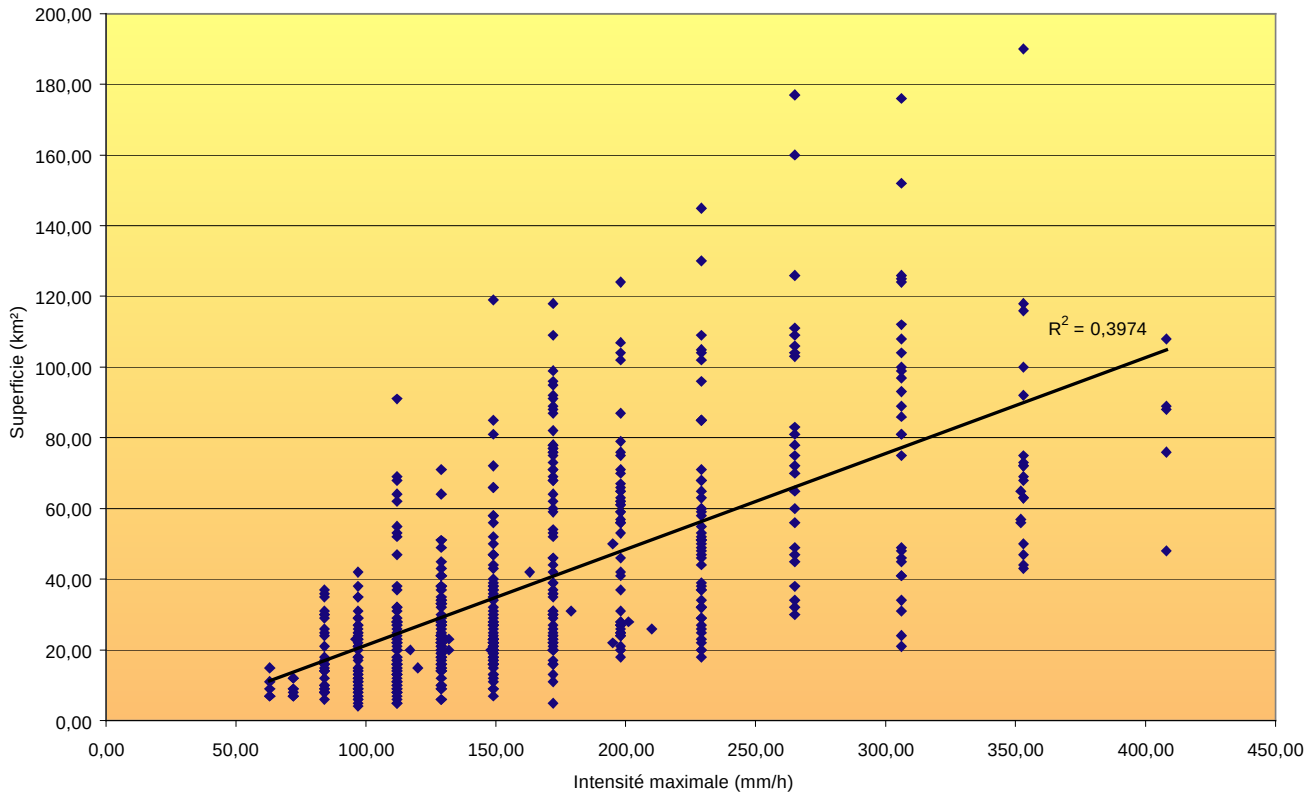


Figure 5.59 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 29 juillet 2005

2.6 Synthèse des résultats

2.6.1 *Une répartition aléatoire des noyaux de pluie de forte intensité pour des trajectoires semblables ?*

L'étude de la répartition globale de l'ensemble des centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité apporte plusieurs informations intéressantes. En premier lieu, nous constatons une distribution des noyaux à large échelle sur l'ensemble de la vallée du Rhône, et même plus largement sur tout le quart sud-est de la France. En effet, le radar météorologique de Saint Nizier d'Azergues permet de repérer ces amas de forte intensité jusqu'aux versants sud-ouest du Massif Central ou au sud des Vosges, soit à 280 km environ (fig. 5.60).

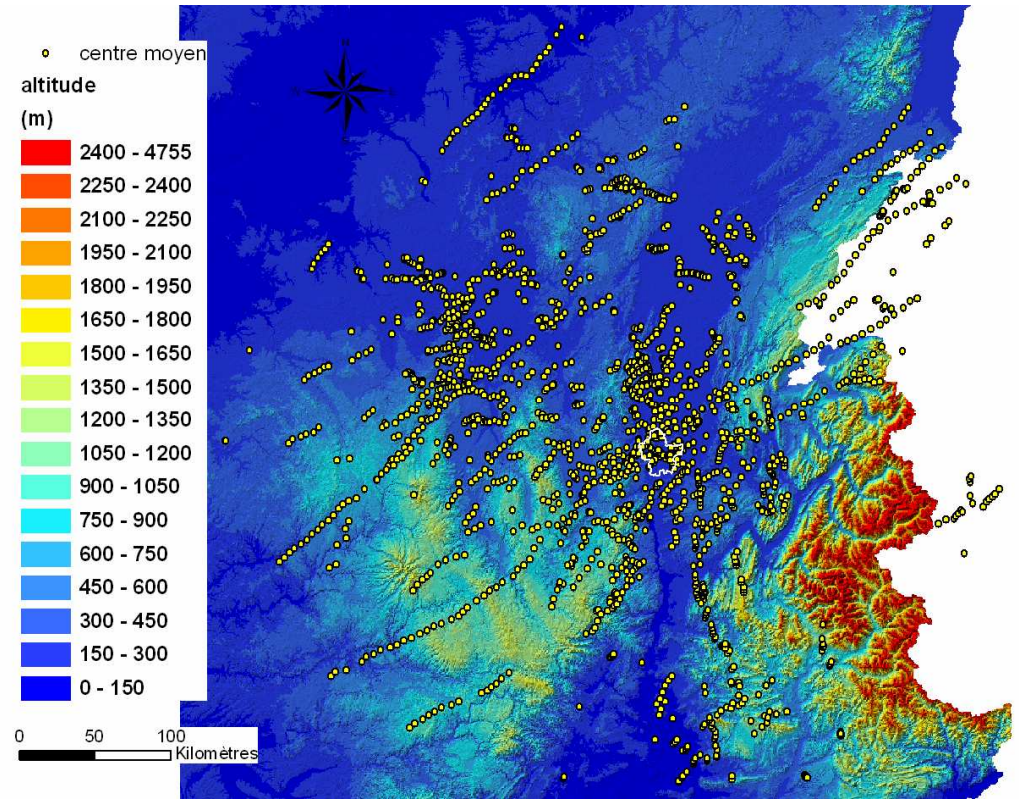


Figure 5.60 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005, dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

En second lieu et d'une manière uniquement visuelle, les noyaux de pluie de forte intensité se distribuent d'une manière relativement homogène. En effet, les secteurs élevés du Massif central, des Alpes ou du Jura ne sont pas ici les plus fournis en noyaux de pluie de forte intensité. Les sommets n'apparaissent pas plus affectés que les zones de plaine (l'absence de noyaux détectés au-dessus des Alpes uniquement vient des limites de vision du radar liés au très hauts reliefs alpins – cf. partie précédente).

Il en est de même pour les zones urbaines, et en particulier l'agglomération lyonnaise. Contrairement aux idées locales reçues, le Grand Lyon ne concentre pas plus les noyaux de pluie intense que les zones plus rurales moins urbanisées aux alentours. En effet, la densité de noyaux recensés au-dessus de l'agglomération urbaine lyonnaise n'est pas plus forte qu'en d'autres secteurs moins anthropisés (fig. 5.61). Ce constat est d'autant plus intéressant que les épisodes ont été sélectionnés à cause de leurs intensités remarquables enregistrées précisément au-dessus du territoire du Grand Lyon, par le réseau de mesure au sol.

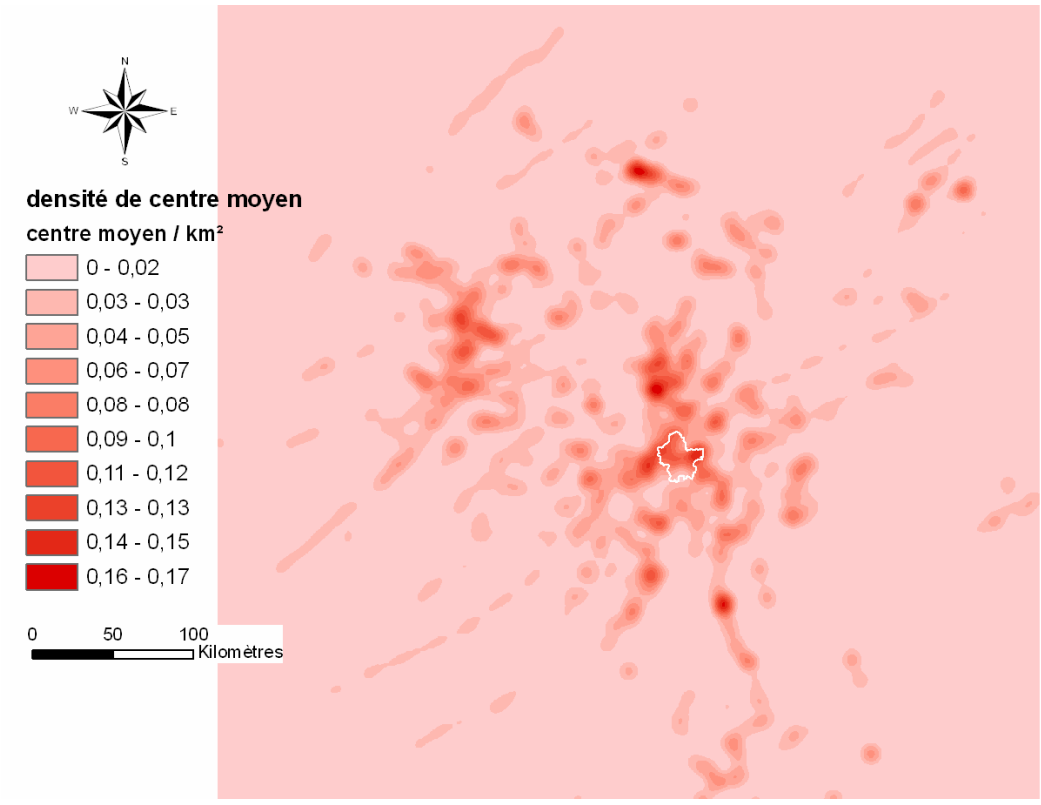


Figure 5.61 : Densité des centres moyens pondérés des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005, dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues. Le territoire du Grand Lyon n'est pas la zone la plus densément touchée par les noyaux.

Les densités maximales relevées sur le Grand Lyon sont de 0,149 noyaux par km², sur l'est de l'agglomération, et de 0,127 noyaux par km² sur l'ouest, alors que des densités supérieures, comprises entre 0,15 et 0,17, sont relevées à une cinquantaine de kilomètres au nord de Lyon dans la vallée de la Saône, à l'est du Morvan et à 90 kilomètres environ au sud de Lyon dans la vallée du Rhône.

À l'échelle du Grand Lyon, les centres moyens pondérés se répartissent sur l'ensemble du territoire, exception faite du sud de l'agglomération et d'une partie centre-est (fig. 5.62). Les zones les plus touchées par les noyaux de pluie de forte intensité sont la plaine de l'est de l'agglomération et le nord-ouest (fig. 5.61 et 5.62).

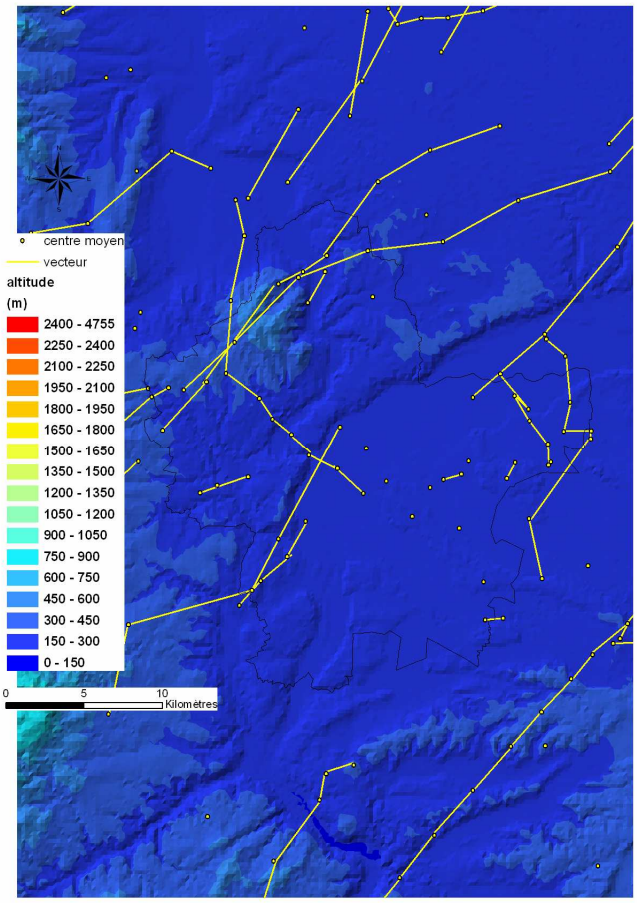


Figure 5.62 : Centres moyens pondérés et vecteurs de déplacement des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005 sur le Grand Lyon

La répartition des trajectoires des noyaux de pluie de forte intensité suit forcément la distribution des centres moyens pondérés (fig. 5.63). Cependant, l'étude des déplacements est intéressante et apporte des informations complémentaires. En effet, aucun noyau en provenance du nord ou de l'est n'a été identifié lors de l'analyse de ces cinq épisodes. Ils proviennent de l'ouest pour l'épisode du 19 septembre 2002, du sud-ouest pour les épisodes

des 09 septembre 2002, 23 juillet 2004 et 29 juillet 2005, et du sud pour l'épisode du 04 août 2004. Il est très intéressant de noter que des noyaux de pluie de forte intensité adoptent des trajectoires perpendiculaires aux crêtes du Massif Central ou du sud du Jura, et que l'orographie ne semble pas influer véritablement sur leurs orientations. En outre, à de nombreuses reprises, il a été possible de suivre le déplacement d'un même noyau durant plusieurs heures et sur plusieurs centaines de kilomètres.

D'un point de vue local, les trajectoires déjà mises en évidence sur l'ensemble de la zone de couverture du radar se retrouvent sur le territoire du Grand Lyon. En effet, ce dernier est la zone de passage de noyaux provenant de l'ouest, du sud-ouest ou du sud (fig. 5.62). Le nord-ouest du Grand Lyon, avec sa topographie contrastée, et la plaine de l'est de l'agglomération sont les deux zones qui comptent le plus de passages de noyaux de forte intensité. En l'état actuel des travaux, rien n'indique que cette distribution soit liée à des facteurs locaux de type anthropiques ou topographiques pour ne citer que deux facteurs traditionnellement les plus évoqués, ou que cette répartition est déterminée par d'autres facteurs d'échelle beaucoup plus large.

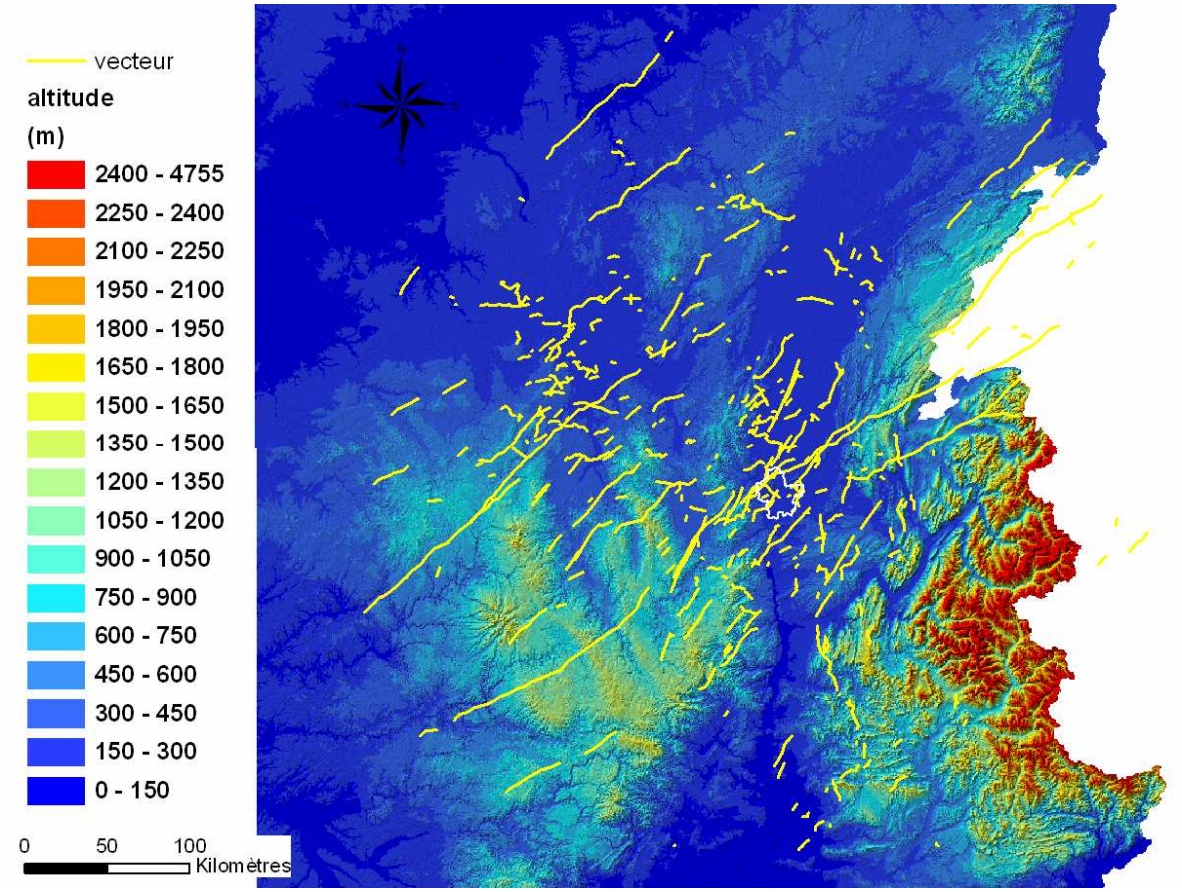


Figure 5.63 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005, dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues

2.6.2 Des noyaux de forte intensité aux caractéristiques communes ?

En moyenne, 378 noyaux de pluie de forte intensité ont été analysés, pour un total de 1891 entités (tableau 5.7). L'échantillon d'analyse des centres moyens est donc très considérable, ce qui apporte une relative robustesse aux résultats exprimés. En moyenne, l'intensité maximale sous un noyau est de 157,2 mm/h, avec un écart type de 24,1 mm/h. L'intensité maximale la plus forte enregistrée au cours de l'analyse des cinq épisodes pluvieux l'a été le 23 juillet 2004, avec 597 mm/h au nord du Massif central (tableau 5.8). Cette valeur est toutefois à prendre avec précaution et en connaissance des techniques et des limites inhérentes à la mesure radar.

L'intensité moyenne et l'aire moyenne d'un noyau, tel que défini par le mode opératoire, est de 96 mm/h pour 25,6 km². Il est intéressant de remarquer le très faible écart type de l'intensité, avec seulement 5,7 mm/h. L'aire moyenne nous indique que le rayon d'un noyau de forme idéalement ronde est de 2,85 km. Or, l'étude dans les chapitres précédents du réseau de mesure au sol de la communauté urbaine de Lyon nous a montré que la distance minimale moyenne entre deux postes est de 3,4 km. Ce réseau de mesure, déjà très dense au regard des autres dispositifs opérationnels français et européen, ne le serait pas encore tout à fait assez pour une mesure vraiment précise de la grande majorité des noyaux de forte intensité. Cependant, il convient de relativiser ces résultats, car l'analyse nous a montré que généralement, un noyau adopte une forme plutôt allongée, avec en moyenne une longueur deux fois plus grande que la largeur. Dans ces conditions, ce réseau de pluviomètres reste un outil de mesure très performant pour l'étude des noyaux de forte intensité. Ces derniers présentent en moyenne une rotation de 89,7°N, avec ici aussi un faible écart type de 11,4°N.

L'étude des trajectoires des noyaux de forte intensité des cinq épisodes de l'échantillon nous a révélé que ces entités provenaient du sud-ouest pour trois d'entre elles avec 36,9°N, 66,4°N et 47,3°N ; de l'ouest pour un épisode avec 80,2°N, et du sud pour le dernier. Globalement, dans un même pas de temps, tous les vecteurs de déplacement adoptaient des trajectoires plutôt parallèles, avec une variance circulaire moyenne faible (0,12). Pour finir l'étude des trajectoires, les vitesses moyennes des noyaux de forte intensité étaient comprises entre 25,6 et 66,5 km/h. Il en résulte une vitesse moyenne de 41,8 km/h, avec un écart type de 14,8 km/h. Enfin, la vitesse la plus rapide enregistrée l'a été le 29 juillet 2005 avec 105,3 km/h. Une vitesse élevée des noyaux est un facteur à risque à prendre en compte, mais la vitesse minimale est aussi une caractéristique à surveiller de près. En effet,

les noyaux stationnaires sont les plus dangereux du fait de leur immobilité, et donc ainsi de la quantité de pluie déversée sur une même zone. Ainsi, la vitesse la moins élevée enregistrée a été de 8,5 km/h, le 04 août 2004.

	09/09/02	*19/09/02*	*23/07/04*	*04/08/04*	*29/07/05*	*moyenne*	*écart type*
Noyaux analysés	290	378	145	514	564	378	151
Intensité maximale (mm/h)	141,6	129	198	149,1	168,5	157,2	24,1
Intensité moyenne (mm/h)	93	91,9	107,2	92,7	95,3	96,0	5,7
Superficie (km²)	10,5	9,6	45,7	22,4	39,9	25,6	14,8
Forme	2,6	1,8	2,5	2	1,9	2,1	0,3
Rotation (°N)	82	77,7	108,3	83,3	97,2	89,7	11,4
Direction	SW-NE	W-E	SW-NE	S-N	SW-NE		
Orientation (°N)	36,9	80,2	66,4	234,5	47,3	93,1	72,3
Variance circulaire	0,04	0,15	0,04	0,33	0,05	0,12	0,11
Vitesse (km/h)	36,4	30,3	50,4	25,6	66,5	41,8	14,8

Tableau 5.7 : Caractéristiques moyennes des cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité en 18 minutes, de la période 2001-2005

	09/09/2002	*19/09/2002*	*23/07/2004*	*04/08/2004*	*29/07/2005*
Intensité maximale (mm/h)	427	285	597	356	408
Superficie (km²)	51	41	191	106	190
Vitesse (km/h)	59,2	62,4	89,5	43,6	105,3

Tableau 5.8 : Caractéristiques maximales des cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité en 18 minutes, de la période 2001-2005

Une analyse comparative sur le territoire du Grand Lyon peut être menée entre les intensités maximales enregistrées par le radar et celles relevées par le réseau de mesure au sol. Le radar est un outil qui permet d'appréhender l'aléa pluvial en tout point du territoire lyonnais, au contraire du parc de pluviomètres. Etant donné les caractéristiques obtenues précédemment concernant la superficie des noyaux, nous pouvons donc nous attendre à avoir, pour un même épisode, une intensité maximale issue du radar supérieure à celle

obtenue avec le réseau de mesure au sol. La comparaison des intensités maximales obtenues à l'aide de ces deux types d'outils de mesure pour les cinq épisodes de l'échantillon va bien dans ce sens (tableau 5.9). En effet, pour les épisodes pluvieux du 09 septembre 2002, du 19 septembre 2002, du 23 juillet 2004 et du 04 août 2004, systématiquement, l'intensité maximale obtenue avec le radar météorologique est supérieure à celle obtenue avec le réseau de mesure au sol. Par exemple, pour le 09 septembre 2002, l'intensité maximale mesurée avec le radar est de 278 mm/h, et celle obtenue par le réseau de pluviomètres est uniquement de 222 mm/h. La différence est encore plus forte pour l'épisode du 04 août 2004, avec un écart de 75 mm/h en faveur du radar.

L'épisode du 29 juillet 2005 fait figure d'exception, car l'intensité maximale de 174 mm/h enregistrée avec le réseau de mesure au sol est supérieure à celle de 129 mm/h obtenue avec le radar météorologique. Une explication réside peut-être dans la vitesse de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité. En effet, cet épisode est celui où la vitesse est la plus élevée avec 66,5 km/h de moyenne, dont une pointe à 105,3 km/h (tableaux 5.7 et 5.8). Le radar fournit une donnée toutes les cinq minutes, au contraire des pluviomètres qui bénéficient d'un enregistrement continu. Le noyau qui possédait l'intensité maximale enregistrée par les pluviomètres a donc pu échapper à la mesure radar lorsque que celui-ci se situait au-dessus du territoire du Grand Lyon, étant donné la vitesse de déplacement très élevée du système.

	Intensité maximale en 5 minutes mesurée par radar (mm/h)	*Intensité maximale en 6 minutes mesurée par les pluviomètres (mm/h)*	*Intensité maximale en 18 minutes mesurée par les pluviomètres (mm/h)*
09/09/2002	278	222	113,3
19/09/2002	138	102	90
23/07/2004	164	154	92
04/08/2004	231	156	111,3
29/07/2005	129	174	87,3

Tableau 5.9 : Intensités maximales pour les cinq épisodes de l'échantillon mesurées avec le radar météorologique et le réseau pluviométrique sur le Grand Lyon

La confrontation des caractéristiques des noyaux deux à deux ne s'est pas révélée extrêmement riche d'information, hormis pour la relation entre l'intensité maximale et la superficie des entités. En effet, pour chacun des épisodes analysés, le nuage de régression donne des coefficients de détermination significatifs (à l'exception de l'épisode du 04 août 2004), avec une moyenne de 0,312 (tableau 5.10). Le nuage de régression des caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » de l'ensemble des 1891 noyaux de

pluie de forte intensité analysés dresse le même constat. En effet, ce nuage fournit un coefficient de détermination de 0,35 (fig. 5.64).

Episode	*09/09/2002*	*19/09/2002*	*23/07/2004*	*04/08/2004*	*29/07/2005*	*Moyenne*
r²	0,27	0,36	0,37	0,16	0,40	0,312

Tableau 5.10 : Coefficients de détermination issus des nuages de régression entre les intensités maximales et les superficies des noyaux de pluie de forte intensité

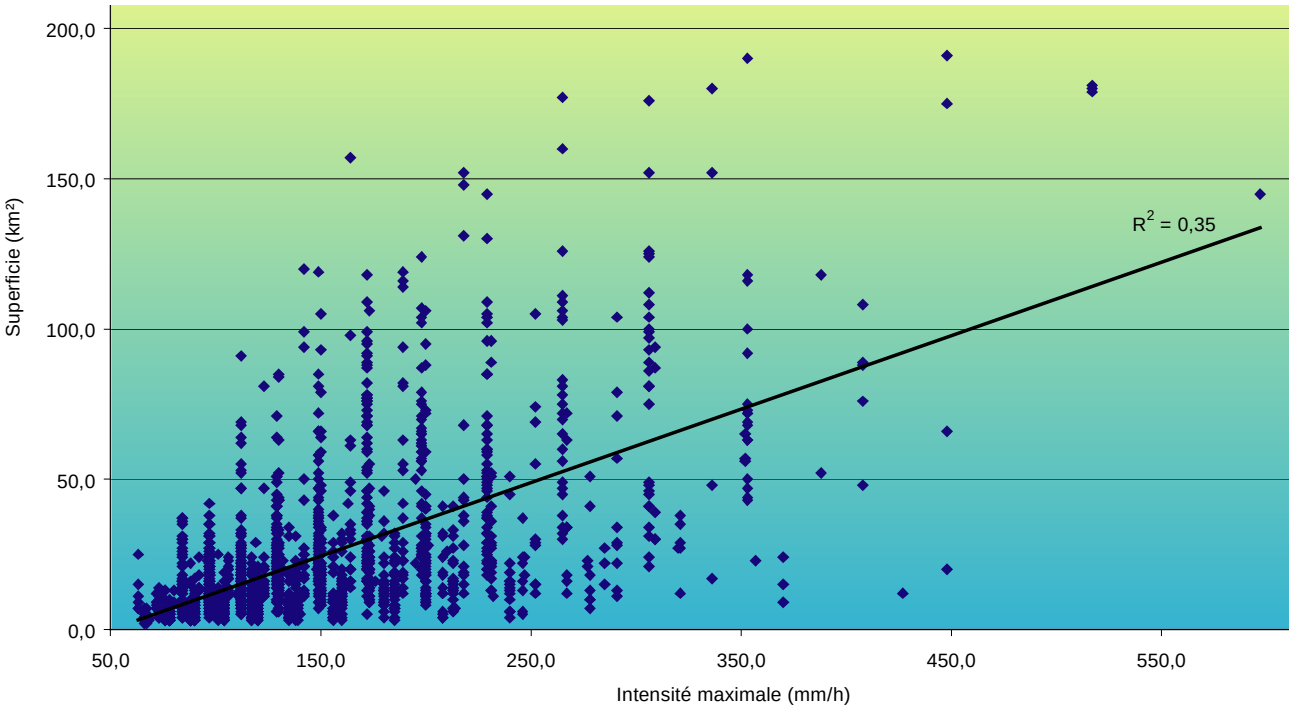


Figure 5.64 : Nuage de régression entre les intensités maximales et les superficies des 1891 noyaux de pluie de forte intensité analysés

Cette relation est même parfois plus pertinente lorsque l'on s'intéresse individuellement aux noyaux de pluie de forte intensité, lorsque l'on arrive à les suivre sur une longue période de temps et sur une grande distance. Dans ces conditions, il arrive que le coefficient de détermination atteigne les 0,5, voire les 0,7. C'est notamment le cas pour un noyau de pluie de forte intensité identifié le 29 juillet 2005, et suivi durant 02h10 sur 140 kilomètres (fig. 5.65). Le nuage de régression des caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » fournit ici un coefficient de détermination de 0,78 (fig. 5.66).

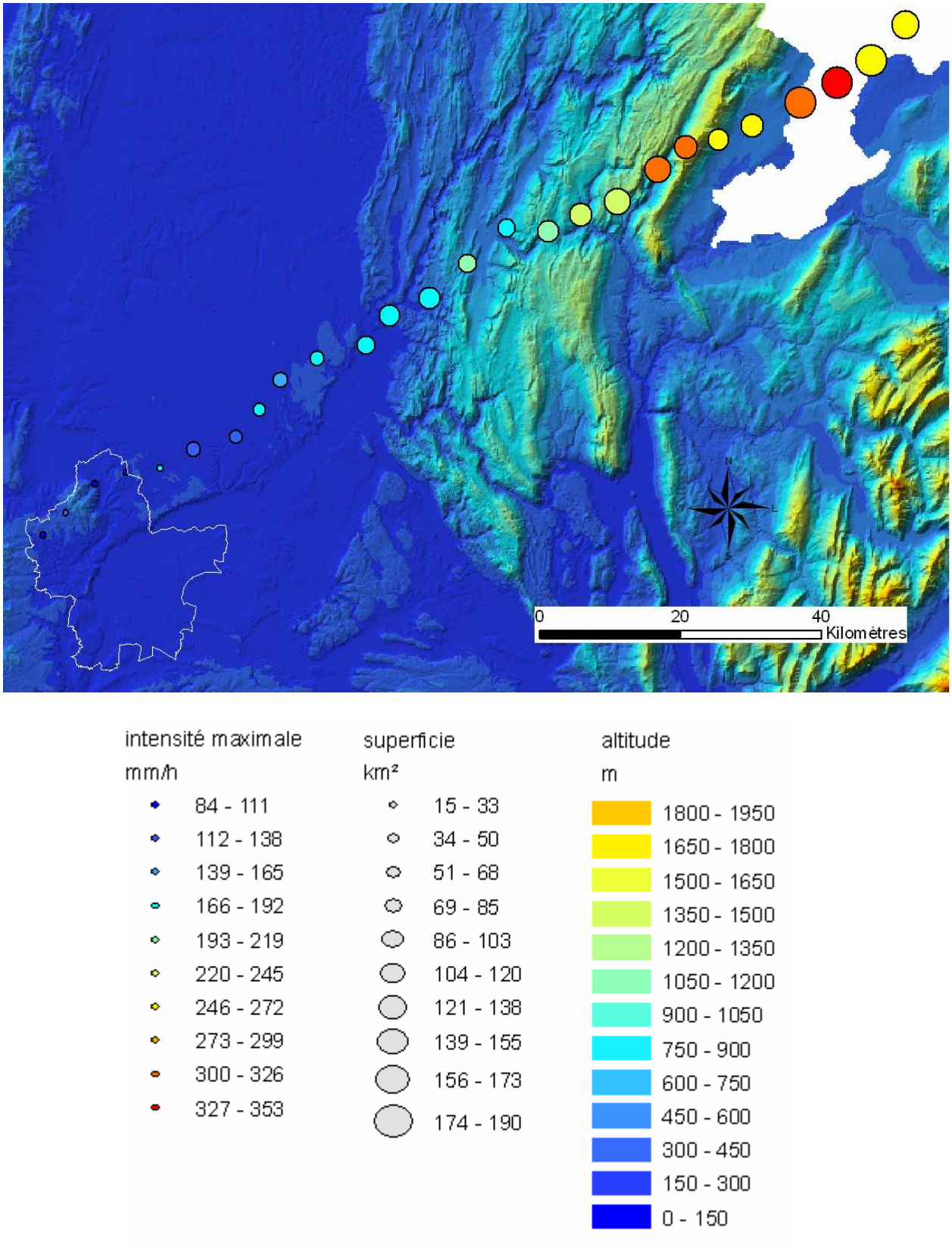


Figure 5.65 : Intensité maximale et superficie d'un même noyau de forte intensité analysé au cours de l'épisode du 27 juillet 2005

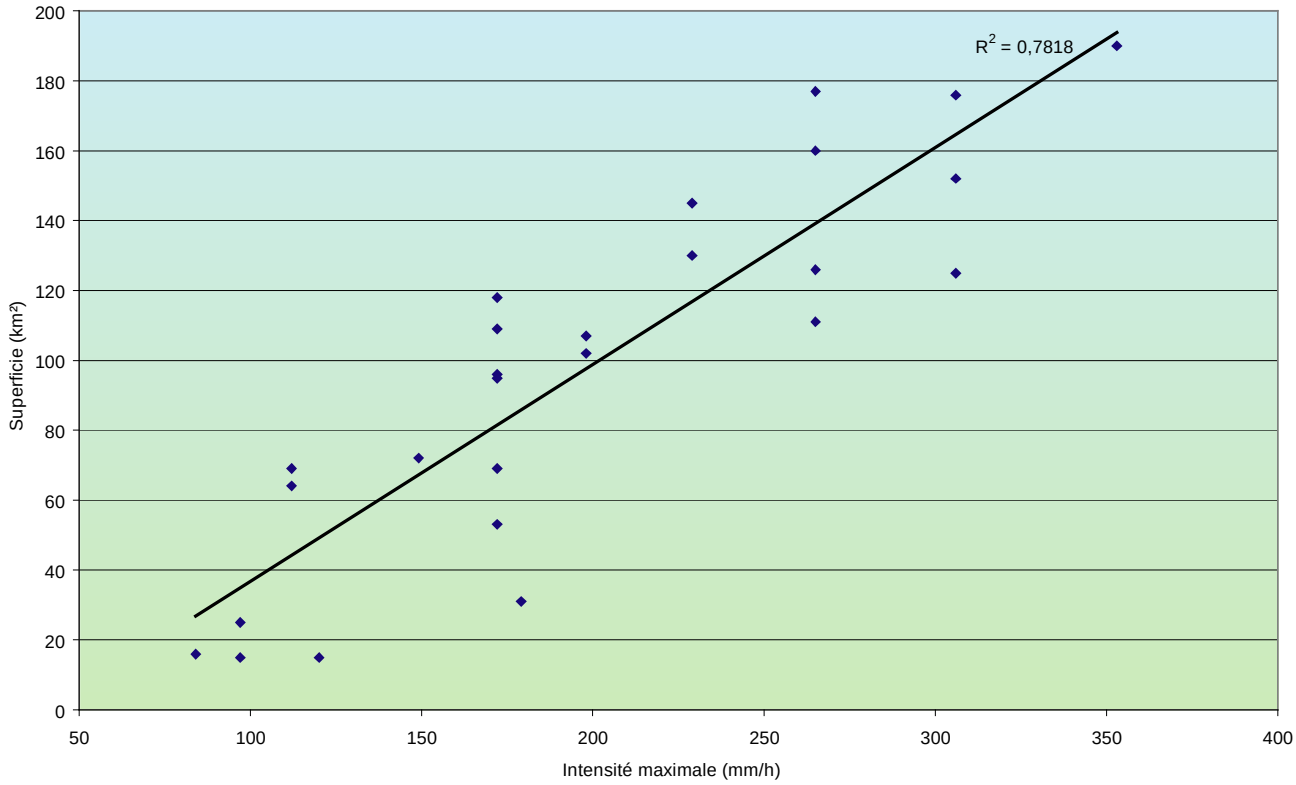


Figure 5.66 : Nuage de régression entre les intensités maximales et les superficies du noyau analysé le 27 juillet 2005

Synthèse de la partie : des caractéristiques communes aux épisodes analysés

Le radar météorologique de Météo-France, situé à Saint-Nizier d'Azergues, possède une qualité de mesure hydrologique satisfaisante sur l'agglomération du Grand Lyon (cf. partie précédente). Dans la continuité et à l'aide du même outil de mesure des précipitations, cette partie a élargi le champ d'étude de l'aléa pluvial. En effet, cette dernière n'est plus seulement l'aire urbaine lyonnaise, mais toute l'étendue de la zone de couverture du radar. La méthodologie mise en place a permis une analyse fine des caractéristiques des noyaux de pluie intense.

Le caractère novateur de ce mode opératoire est qu'il s'appuie sur un SIG, où un modèle de traitement automatique a été implémenté afin de pouvoir analyser un maximum

de noyaux de pluie de forte intensité en un minimum de temps et d'opérations manuelles. Les cinq épisodes pluvieux les plus intenses en 18 minutes de la période 2001-2005 ont donc été étudiés. La procédure mise en œuvre a ainsi permis de traiter 1891 noyaux de pluie de forte intensité sur l'ensemble de la zone de couverture du radar.

Il en ressort une distribution assez homogène. En effet, les épisodes étudiés ont été choisis pour leur intensité maximale enregistrée sur le Grand Lyon, mais au final ce territoire n'est pas la zone qui concentre le plus d'occurrence de noyaux de forte intensité.

Cependant, l'analyse des trajectoires de ces noyaux de pluie de forte intensité fournit des résultats clairs et sans équivoque. Pour trois des épisodes étudiés, les noyaux arrivent du sud-ouest français, adoptent une trajectoire rectiligne dans la zone couverte par le radar météorologique et s'évacuent par le nord-est. Dans beaucoup de cas traités, ces noyaux suivent une trajectoire rectiligne au-dessus du Massif Central et de l'aire urbaine du Grand Lyon. Un épisode montre des noyaux de forte intensité qui arrivent du sud, et un autre de l'ouest. Dans les épisodes traités, jamais un noyau en provenance de l'est ou du nord ne s'est manifesté (Renard et Comby, 2010b ; Renard et al., 2011).

La méthodologie mise en place a permis de fournir des statistiques intéressantes sur les caractéristiques étudiées, telles que les intensités maximales rencontrées dans un noyau de pluie, leur forme et leur superficie, ou encore sur leurs vitesses. Ainsi, en moyenne, l'intensité maximale sous un noyau est de 157,2 mm/h, sa superficie est de 25,6 km², et la forme du noyau est plutôt allongée, avec une longueur deux fois plus grande que la largeur. Enfin, en moyenne, la vitesse des noyaux est de 41,8 km/h.

Les comparaisons des intensités maximales relevées sur le Grand Lyon entre le réseau de mesure au sol et celles mesurées avec le radar météorologique nous ont révélé, sans surprise, que les valeurs obtenues avec le radar étaient supérieures à celles fournies par les pluviomètres. Cependant, l'épisode du 29 juillet 2005 échappe à cette règle car les intensités fournies par les pluviomètres sont supérieures à celles du radar météorologique. Une explication réside sans doute dans la vitesse très élevée du système pluvieux. En effet, cet événement pluvieux est le plus rapide de tous ceux analysés. En outre, le radar fourni une mesure toutes les cinq minutes. Ainsi, en raison de cette vitesse élevée associée à cette fréquence de mesure, le radar n'a peut être pas pu capter le moment précis où l'intensité était la plus élevée sur le Grand Lyon ; au contraire des pluviomètres, qui fournissent une mesure ponctuelle mais continue.

Enfin, la confrontation des caractéristiques a révélé une relation entre l'intensité maximale des noyaux de pluie de forte intensité et leur superficie. En effet, et dans les limites des coefficients de détermination obtenus, les intensités maximales et les aires des

noyaux de pluie évoluent de concert. Cependant, il s'agit de la seule relation convaincante obtenue. Contrairement à ce que l'on aurait pu penser avant l'analyse, il n'existe par exemple pas de relation entre la vitesse des noyaux de pluie et leurs intensités maximales, ou leur forme, pour n'en citer que deux.

L'une des perspectives de ce travail serait de mettre en parallèle les caractéristiques issues du processus d'analyse avec les différents types de situation, sur lesquels les travaux sont nombreux (par exemple Comby, 1998 ; Vigneau, 2004 ; Cantat, 2004 ; Carrega, 2004 ; Douguedroit, 2004). En effet, ces dernières pourraient notamment être confrontées aux trajectoires, aux vitesses et aux intensités des noyaux, en s'appuyant par exemple sur une méthode du type de celle de la classification européenne de Hess-Brezowsky (Douvinet et al., 2008 et 2009 ; Bigot et al., 2007 ; Rome et al., 2009).

Un autre prolongement pourrait être de mettre en relation les occurrences de noyaux de forte intensité au dessus-du Grand Lyon avec ses îlots de chaleur et de fraîcheur urbains, sur lesquels les travaux sont ici aussi déjà nombreux (Achour-Bouakkaz et Abdou, 2008 ; Carrega et Rosa, 2005 ; Beltrando et Dahech, 2005, notamment).

L'aléa pluvial sur le Grand Lyon a donc fait l'objet d'études menées conjointement avec deux outils complémentaires : d'un côté le réseau de mesure au sol constitué de pluviomètres, et de l'autre le radar météorologique de Météo-France. Ces études complémentaires ont livré un grand nombre d'informations qui viennent d'être synthétisées, aussi bien sur le comportement spatial que temporel de l'aléa, notamment lorsque celui-ci s'avère particulièrement intense. Ces résultats issus de la caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais vont maintenant servir de base dans l'étude des nuisances associées. Plus précisément, ces résultats qui portent sur le comportement des pluies remarquables vont être confrontés aux débordements du réseau d'assainissement. L'objectif est d'en tirer de nouvelles connaissances sur les causes et les conséquences de ces dysfonctionnements, dans une optique d'amélioration de la gestion du risque associé par les gestionnaires de ce territoire.

Chapitre 3
Les impacts de l'aléa pluvial sur le système d'assainissement nécessitent une évaluation de la vulnérabilité territoriale

---

Partie 1 : Mise en évidence de relations entre débordements et pluies

Après avoir s'être focalisé sur la caractérisation de l'aléa pluvial à l'aide d'outils de mesure complémentaires dans les chapitres un et deux, il est maintenant nécessaire de porter notre réflexion sur les relations entre cet aléa et les nuisances qui s'ensuivent. En milieu urbain, les inondations par ruissellement sont les plus fréquentes, et les préjudices causés par la pluie mettent en cause, la plupart du temps, le fonctionnement du système d'assainissement.

Pendant la période médiévale, les notions de salubrité sont relatives, et même inexistantes. Les déchets domestiques, solides comme liquides, sont jetés dans les rues et évacués au hasard des pluies. En l'absence d'égouts, les rues offrent un spectacle infâme, et les épidémies telles que la peste, le choléra ou le typhus sont fréquentes et tuent des milliers de personnes en Europe chaque année. En réaction, le mouvement hygiéniste apparaît au milieu du XIX^{ème} siècle en Angleterre. Il préconise de collecter les eaux urbaines et de les mener jusqu'à des sites de rejets en milieu naturel, par le biais de canalisations enterrées. Les eaux usées comme les eaux pluviales sont mélangées dans ces conduites, ce qui initie le réseau de tout à l'égout (Carré, 2002a et 2002b ; Chocat et al., 2007 ; Granger 2009 ; Caradot, 2009, Caradot, 2010a).

Cependant, dès le début du XX^{ème} siècle, la concentration de ces rejets urbains en de nombreux points de cours d'eau commence à être problématique. Cela a pour effet de développer les techniques d'épuration, qui ne se généraliseront en France cependant qu'après la première grande loi sur l'eau de 1964. Cette loi, qui concerne le régime et la répartition des eaux et la lutte contre leur pollution, a permis la création des agences financières des bassins, précurseurs des actuelles agences de l'eau. Toutefois, le caractère unitaire des réseaux d'assainissement et le tout à l'égout compromettent l'efficacité des stations d'épuration. En effet, même si les réseaux séparatifs étaient déjà préconisés avant la seconde guerre mondiale, la séparation des eaux usées et des eaux pluviales à l'échelle d'un bassin versant est délicate, surtout lors de l'ajout de nouveaux branchements (Carré, 2002a ; Chocat et al., 2007 ; Beucher, 2007 ; Granger, 2009 ; Caradot et al., 2010b).

En outre, en Europe, les eaux pluviales acquièrent un nouveau statut au milieu du XX^{ème} siècle. Ces dernières deviennent une menace, en raison de leur capacité à inonder la ville de manière soudaine. En effet, le dimensionnement des réseaux d'assainissement urbain, réseaux hydrographiques artificiels, se conçoit pour une période de retour donnée. Cette approche, qualifiée d' « hydraulique », comme rappelé par M. Desbordes (1987), qui vise à optimiser les réseaux d'évacuation, ainsi qu'à les doter de bassins de retenue pour permettre l'écrêtement des débits de pointe, montre rapidement ses limites. En effet, lorsque cette période de retour est égalée ou dépassée, le réseau atteint sa limite de capacité et ne peut plus faire face à l'excédent d'eau pluviale. Les épisodes pluvieux en cause débordent du réseau d'assainissement urbain dans le lit majeur, constitué par la voirie urbaine. « Le constat des limites de cette conception de l'assainissement, basée sur l'évacuation rapide des eaux pluviales, a été clairement établi. Il conduit au développement de techniques alternatives qui luttent contre la concentration rapide des eaux pluviales vers l'exutoire en favorisant le stockage des eaux pluviales et leur infiltration » d'une manière locale (Andrieu et al., 2004 ; Carré et al., 2010 ; Villessot et Pin, 2008).

Ce volet du travail va donc s'intéresser précisément à la crue par ruissellement pluvial urbain (ou crue urbaine). Spécifique au milieu urbain, elle découle de l'insuffisance des systèmes artificiels d'évacuation des eaux pluviales d'une agglomération (Chocat, 1997a ; Douvinet, 2008), et sont caractérisées par la brièveté du délai entre la pluie génératrice et les premiers débordements, allant de quelques minutes à quelques heures (Gaber, 2004).

Les acteurs opérationnels et les gestionnaires territoriaux ont pour habitude d'appeler ce type de nuisances des « débordements » du réseau. Il est ici nécessaire de préciser que ce genre de nuisances ne correspond en rien aux inondations par débordement de cours d'eau. En effet, les débordements du système d'assainissement peuvent se manifester dans une zone exempte de cours d'eau. Cependant, ces nuisances sont toujours liées à un quelconque problème de fonctionnement du réseau d'assainissement. Cela peut par exemple être sa mise en charge lors de pluies intenses, ce qui conduit à une stagnation d'eau pluviale, et à terme cela oblige les eaux pluviales à s'écouler par le réseau viaire, provoquant ainsi des dégâts dans l'agglomération urbaine (Barroca et al., 2005 ; Camp'Huis et Devaux-Ros, 2006 ; Barroca et al., 2010).

Cette partie a donc pour objectif d'étudier les relations entre l'aléa pluvial du Grand Lyon et les débordements de son système d'assainissement. Cette étude repose principalement sur l'exploitation d'une base de données qui est constituée au service études de la direction de l'eau du Grand Lyon. Elle est officiellement appelée la « base de données des débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie ». Sa présentation et son

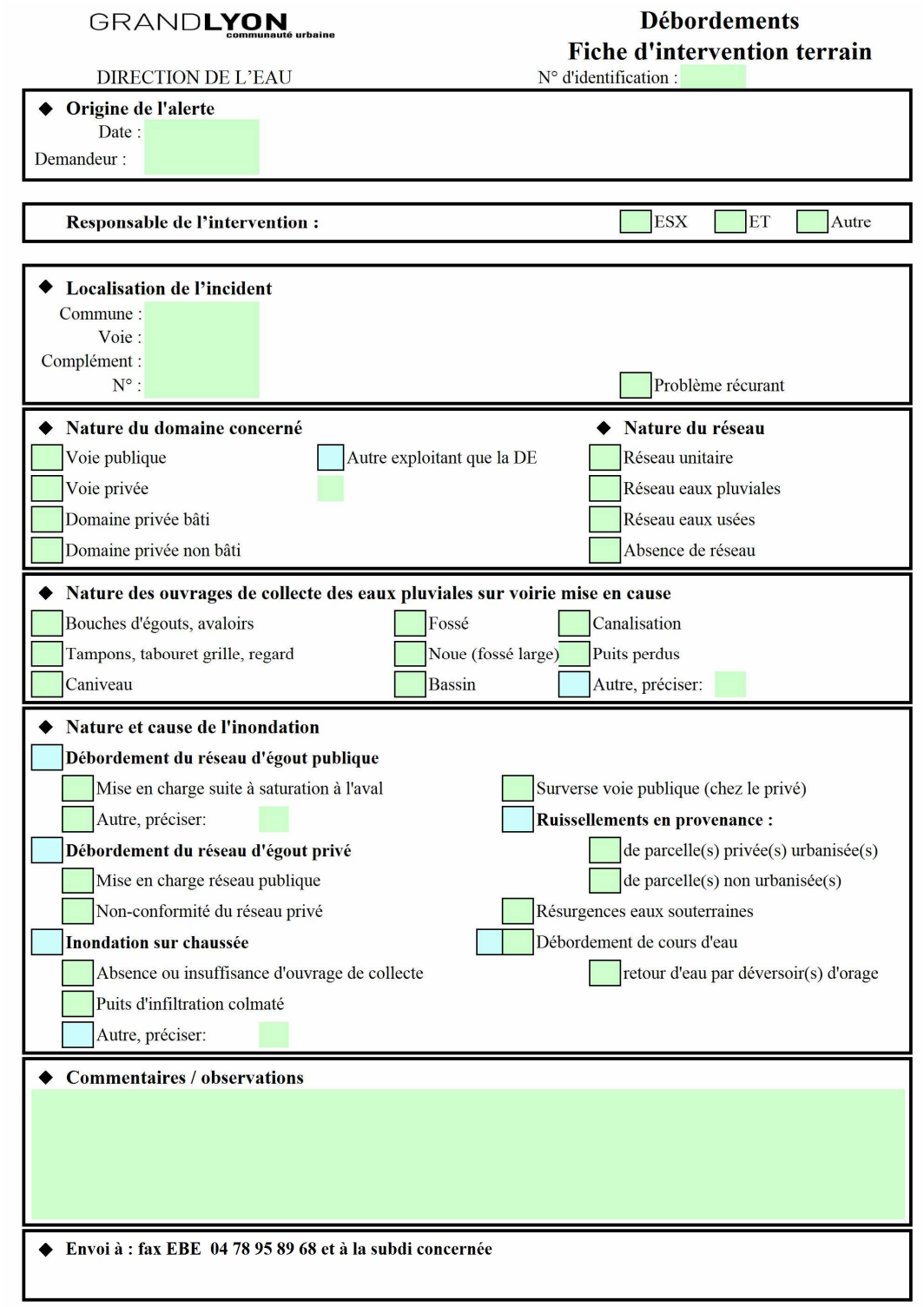
exploitation par le biais de la confrontation avec l'aléa pluvial du Grand Lyon sont donc l'objet des paragraphes suivants.

1. Une base de données fiable et puissante

1.1 Le contenu riche de la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie »

La base de données trouve son fondement dans une approche de terrain et s'articule autour de cinq points clés. Le premier est de capitaliser le savoir existant sur les débordements par temps de pluie du système d'assainissement auprès des agents de terrain. Cette première étape a donc consisté à rencontrer les équipes de terrain afin d'acquérir un maximum de connaissances sur les débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie. Ce travail a abouti à la création d'une base de données qui recense les débordements des réseaux. À chacun des dysfonctionnements recensés sont associés des données telles que la date de l'événement, l'adresse, la cause du débordement ou le type d'ouvrage concerné.

Le second point clé est d'organiser la remontée des informations pour les événements pluvieux à venir qui généreront des débordements. Afin de réaliser un recensement cohérent et pratique des nouveaux événements, une fiche type a été réalisée en collaboration avec les équipes de terrain. D'un format simple, elle se veut facile à saisir pour les égoutiers, tout en apportant les informations essentielles à la valorisation de la donnée. Les deux cents agents potentiellement concernés ont reçu une formation. À la suite de cette formation, des carnets à souches « fiches de débordements » leurs ont été remis (fig. 6.1).



GRANDLYON communauté urbaine

DIRECTION DE L'EAU

Débordements
Fiche d'intervention terrain

N° d'identification :

◆ **Origine de l'alerte**
Date :
Demandeur :

Responsable de l'intervention : ESX ET Autre

◆ **Localisation de l'incident**
Commune :
Voie :
Complément :
N° :
Problème récurant

◆ **Nature du domaine concerné**
Voie publique
Voie privée
Domaine privée bâti
Domaine privée non bâti
Autre exploitant que la DE

◆ **Nature du réseau**
Réseau unitaire
Réseau eaux pluviales
Réseau eaux usées
Absence de réseau

◆ **Nature des ouvrages de collecte des eaux pluviales sur voirie mise en cause**
Bouches d'égouts, avaloirs
Tampons, tabouret grille, regard
Caniveau
Fossé
Noue (fossé large)
Bassin
Canalisation
Puits perdus
Autre, préciser:

◆ **Nature et cause de l'inondation**
Débordement du réseau d'égout publique
Mise en charge suite à saturation à l'aval
Autre, préciser:
Débordement du réseau d'égout privé
Mise en charge réseau publique
Non-conformité du réseau privé
Inondation sur chaussée
Absence ou insuffisance d'ouvrage de collecte
Puits d'infiltration colmaté
Autre, préciser:
Surverse voie publique (chez le privé)
Ruissellements en provenance :
de parcelle(s) privée(s) urbanisée(s)
de parcelle(s) non urbanisée(s)
Résurgences eaux souterraines
Débordement de cours d'eau
retour d'eau par déversoir(s) d'orage

◆ **Commentaires / observations**

◆ **Envoi à : fax EBE 04 78 95 89 68 et à la subdi concernée**

Figure 6.1 : Fiche de débordement à remplir par les agents de terrain lors de dysfonctionnement de réseau

Cette fiche d'intervention terrain recense notamment la date du débordement, la localisation précise de l'incident (commune, rue et numéro), la nature du domaine concerné (voie publique, voie privée, etc.), la nature du réseau (réseau unitaire, pluvial, usé ou

absence de réseau), la nature des ouvrages de collecte des eaux pluviales sur voirie mise en cause (bouche d'égout, canalisation, puits perdu, etc.), ainsi que la nature et la cause de l'inondation. Il peut être suivi d'un commentaire de l'agent, pouvant porter par exemple sur le type de pluies à l'origine des débordements (orage, grêle, etc.). Les fiches sont par la suite à envoyer au Service études de la Direction de l'eau par les agents de terrain, soit par fax, soit par mail. À terme, elles seront saisies directement par les agents à l'aide de tablettes numériques de terrain.

Ensuite, il est nécessaire d'archiver les connaissances issues des données historiques, mais aussi les débordements recensés suite à chaque nouvel événement. Cet archivage se fait dans un premier temps dans une base de données sous forme de tableur *Excel* traité avec des macros, puis ensuite de manière cartographique à l'aide d'un SIG.

Le quatrième point est de prioriser et suivre les aménagements qui ont été mis en place pour limiter les débordements et évaluer leurs impacts, à partir des informations contenues dans la base de données et de réunions régulières avec les agents. En conséquence, une liste de points à traiter en priorité a été établie (Volte et al., 2007).

Pour finir, il est prévu d'identifier les points potentiels de débordements à l'aide de la modélisation du réseau structurant d'assainissement et de les comparer aux informations contenues dans la base de données. Cette base, actualisée en continu, recense pour le moment 2028 débordements constatés entre 1932 et 2009, sur 1156 localisations distinctes. Avant d'utiliser cette base, sa fiabilité va être mise à l'épreuve en la confrontant aux données pluviométriques et à deux autres bases de données complémentaires.

1.2 L'évaluation de la qualité des informations des bases de données permet une exploitation fiable

Afin d'évaluer la fiabilité des informations contenues dans la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie» du Service études de la Direction de l'eau du Grand Lyon, ces dernières vont être confrontées à deux types de données. Les premières sont naturellement les données pluviométriques du réseau de mesure au sol (préférentiellement aux données radars disponibles uniquement à partir de 2001 et d'une manière non continue – cf. chapitre précédent).

Les deuxièmes sont les informations contenues dans deux autres bases de données complémentaires : une base de données constituée à partir d'informations issues du Progrès, le journal local de Lyon, et une seconde fournie par le SDIS (Service Départemental d'Incendie et de Secours).

1.2.1 *Confrontation de la base de données « débordements » aux valeurs pluviométriques*

Le but de cette procédure est de superposer les hauteurs d'eau cumulées du réseau de mesure au sol d'un épisode pluvieux aux débordements qu'il a provoqués, contenus dans la base de données « débordements », afin de vérifier la concordance spatiale. Les résultats sont très satisfaisants comme en témoignent les figures 6.2 à 6.4. Les débordements contenus dans la base de données du Grand Lyon se trouvent en effet dans les zones où les hauteurs d'eau cumulées sont les plus fortes.

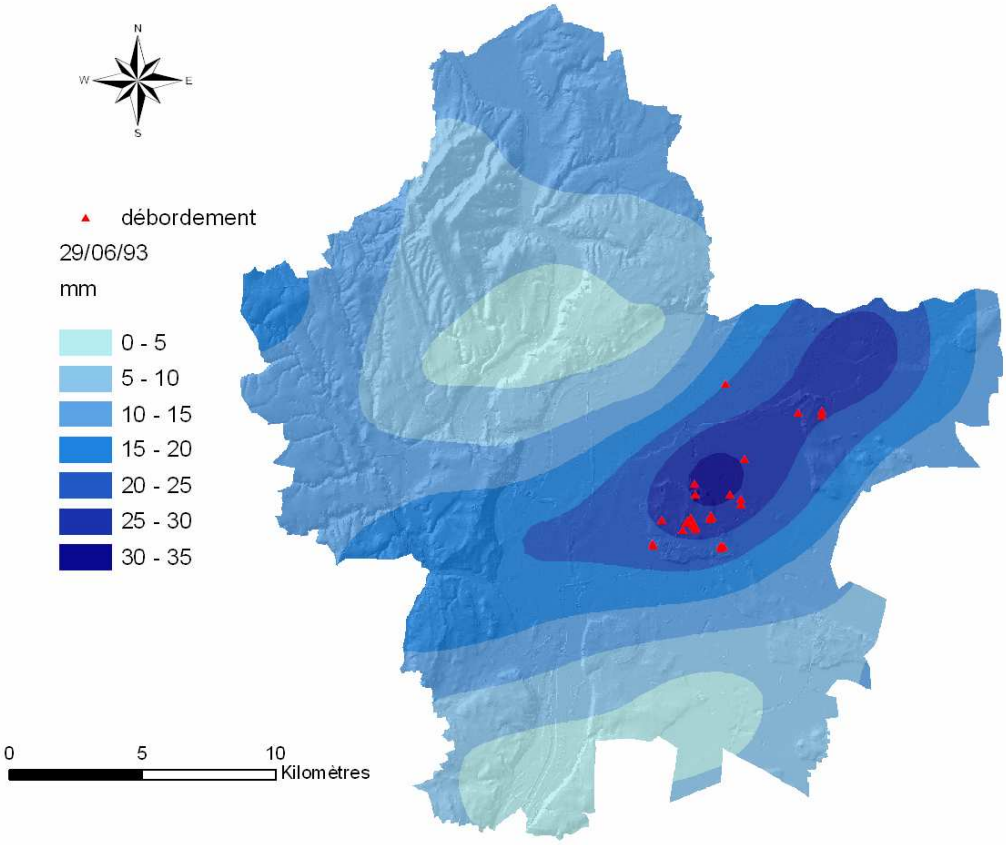


Figure 6.2 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993 et débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau

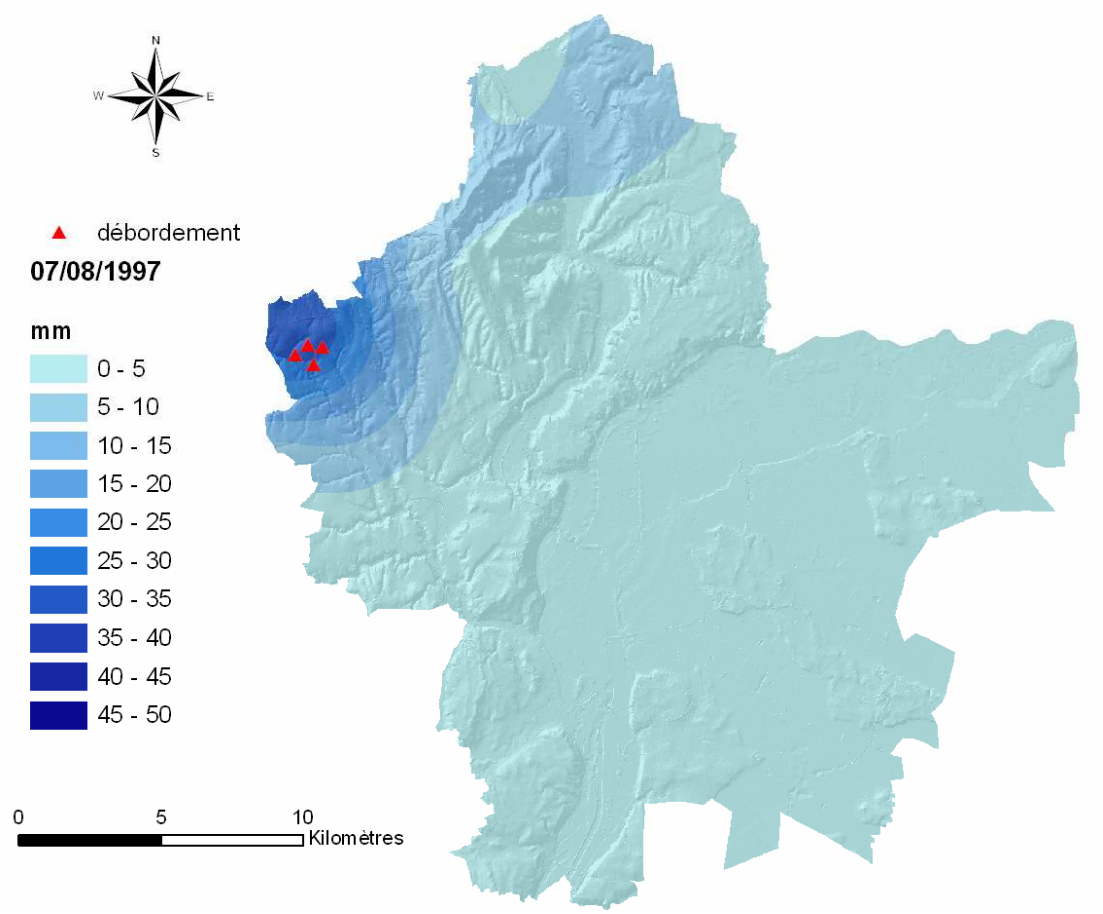


Figure 6.3 : Hauteur d'eau cumulée de l'épisode pluvieux du 07 août 1997 et débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau

Il figure cependant dans la base des débordements qui auraient eu lieu lors de jours où aucune précipitation n'a été enregistrée. Cela peut être en raison d'erreurs de date au moment du remplissage de la fiche par les équipes de terrain, ou lors de la saisie de cette fiche dans la base de données. Dans ce cas, seul le lieu de l'incident est exploitable, ainsi que les données complémentaires (si elles existent), mais en aucun cas il ne peut être mis en relation avec l'événement pluvieux l'ayant provoqué.

Les informations contenues dans la base de données « débordements » du Grand Lyon se révèlent donc fortement corrélées aux hauteurs d'eau cumulées des épisodes pluvieux en question. Cela est un gage de la validité et de la fiabilité des informations de la base de donnée. Cette validation va maintenant se poursuivre avec la confrontation d'autres bases de données d'origines diverses.

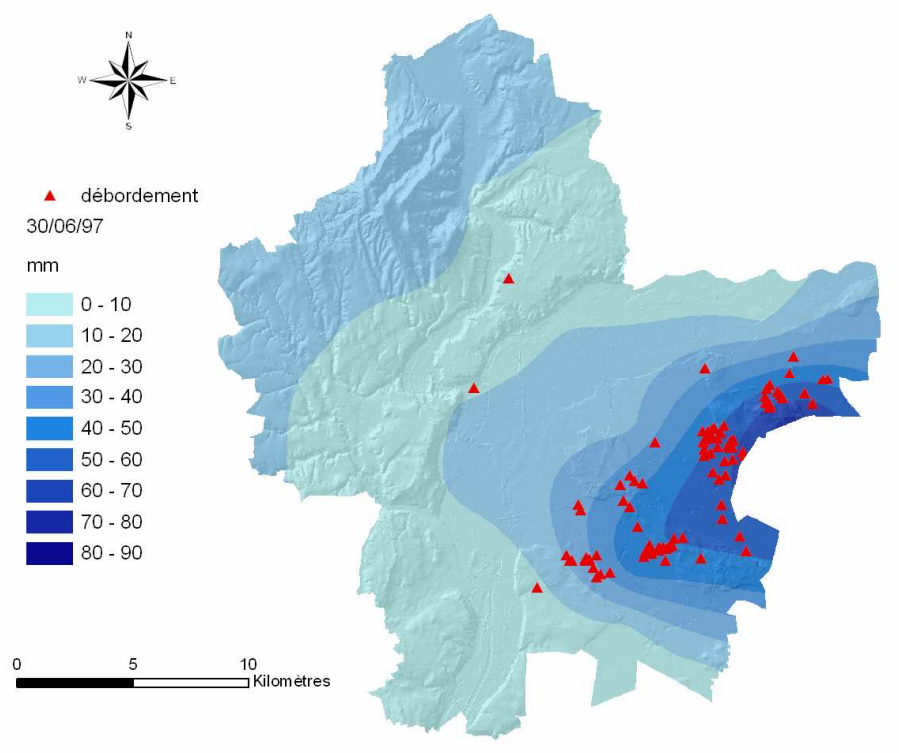


Figure 6.4 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 07 août 1997 et débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau

1.2.2 Confrontation de la base de données « débordements » à la base de données « Progrès »

Cette base de données est constituée d'informations issues du journal local *le Progrès*. Les épisodes pluvieux qui ont provoqué des débordements et qui sont référencés dans la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie» du Service études ont servi de fondement à la base de données « Progrès ». Cette liste a en outre été complétée par les dates des épisodes pluvieux remarquables, lorsqu'ils ne figuraient pas déjà dans la base de données « débordements ».

En effet, les numéros du Progrès datés du jour de la pluie en question ont été consultés, ainsi que les deux jours suivants. Le but était de voir si le dysfonctionnement avait fait l'objet d'articles dans la presse locale et d'obtenir des informations diverses, comme sur l'état « initial » de la situation, sur les mises en alerte spéciales de Météo-France, sur la situation pluviométrique dans le département, ou encore sur les conséquences et les dégâts.

Ce dépouillement, qui a nécessité la consultation de trois cents journaux environ, s'est révélé très enrichissant. En effet, 69 % des dysfonctionnements mentionnés dans la base de données du Grand Lyon sont cités dans des articles du *Progrès*, en général le jour suivant l'épisode pluvieux. Les articles, écrits avec emphase, sont souvent teintés de catastrophisme, mais ils permettent toutefois bien souvent d'obtenir des informations complémentaires sur la date et l'heure des nuisances, la localisation dans le Grand Lyon, le type d'événement pluvieux (orage, grêle, neige, vent, etc.), les types de dégâts (inondations domestiques, voies de communication bloquées, etc.), et le nombre d'interventions de pompiers.

Dans la très grande majorité des cas, les nuisances de la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie», les inondations contenues dans la base de données « Progrès », ainsi que les hauteurs d'eau pluviométriques concordent spatialement d'une manière très satisfaisante, comme c'est le cas pour les événements du 1er juillet 1993 et du 07 septembre 1995 (figures 6.5 et 6.6).

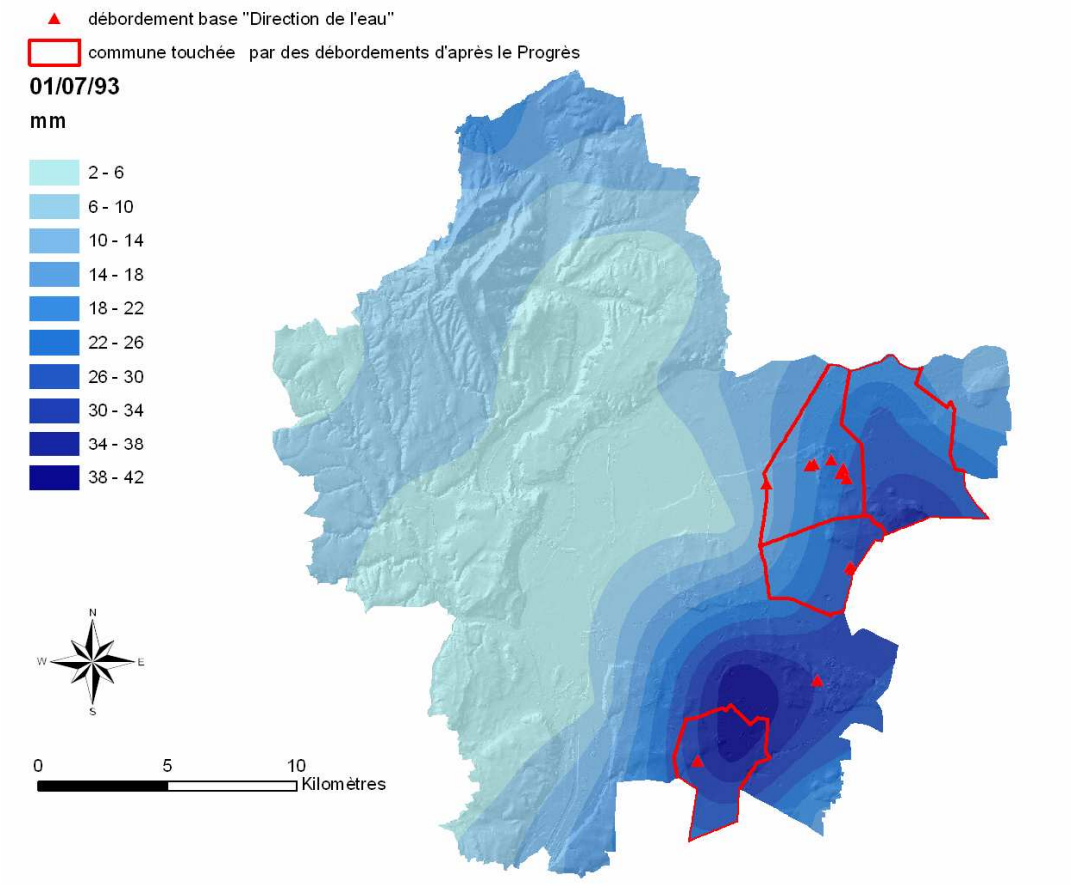


Figure 6.5 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 1er juillet 1993, débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau et communes victimes d'inondations d'après le Progrès *(le journal nous renseigne en outre sur le caractère orageux de l'événement)*

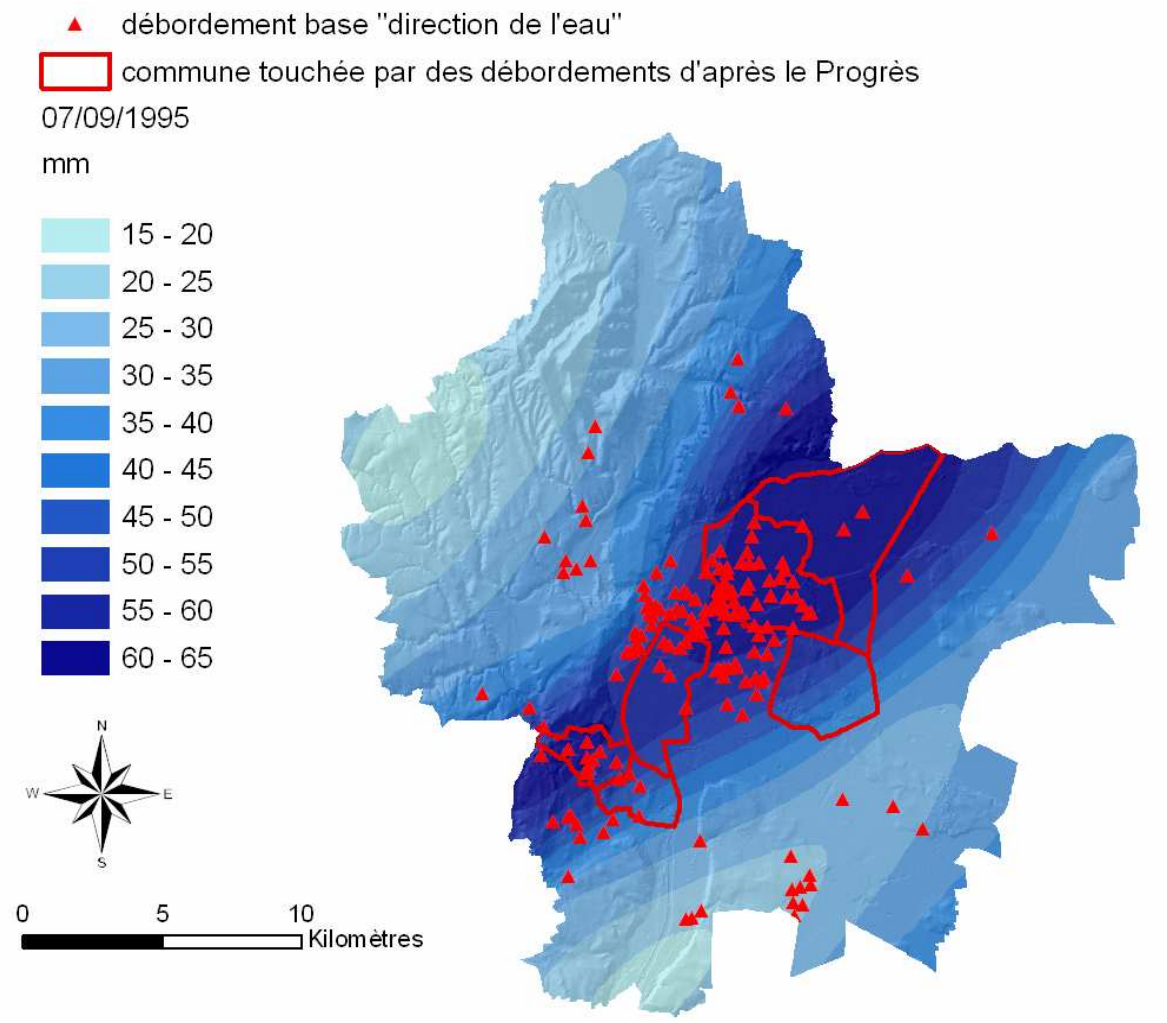


Figure 6.6 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 07 septembre 1995, débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau et communes victimes d'inondations d'après le Progrès *(le journal nous renseigne en outre sur le caractère orageux de l'événement)*

Cependant, pour certains épisodes pluvieux, il existe des débordements dans une des bases mais non dans l'autre. En effet, les données contenues dans la base de données « débordements » ne peuvent être exhaustives, en raison de limites liées aux moyens humains disponibles sur le terrain, et le journal du *Progrès* n'a pas l'obligation de traiter de toutes les nuisances liées à l'eau. Cependant, ces deux sources d'information se complètent, comme lors de l'épisode du 12 mai 1993 (fig. 6.7). Lors de cet épisode pluvieux, les nuisances contenues dans la base de données « débordements » ne correspondent ni à la localisation des plus fortes hauteurs d'eau cumulées, ni aux inondations recensées par le *Progrès*. Cela met en lumière les faiblesses de chacune des bases de données, aucune des deux ne pouvant être exhaustive.

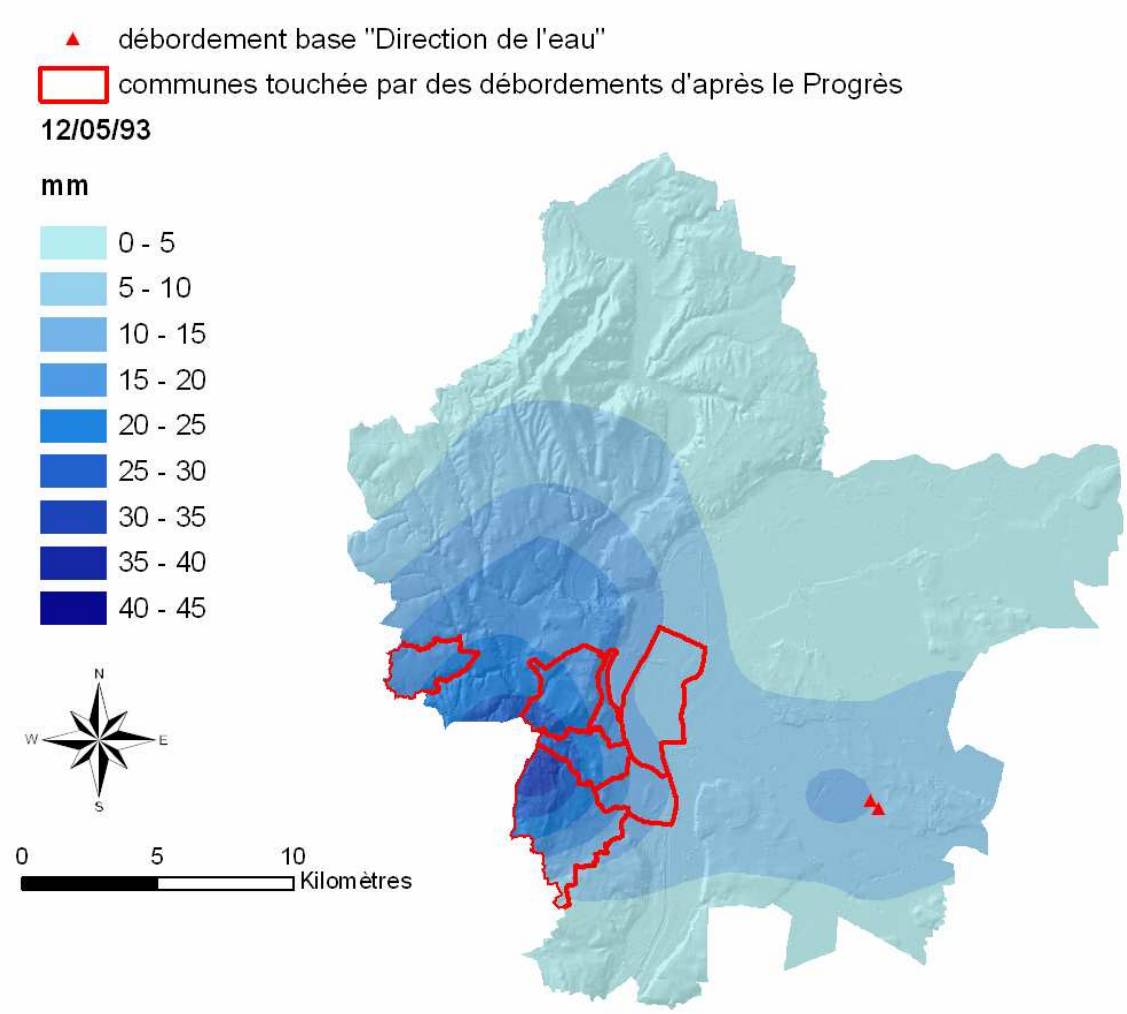


Figure 6.7 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 12 mai 1993, débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau et communes victimes d'inondations d'après le Progrès (le journal nous renseigne en outre sur la présence de grêlons lors de l'événement)

1.2.3 Confrontation de la base de données « débordements » à la base de données « SDIS »

Après plusieurs années de tractations, le SDIS nous a fourni une base de données portant sur les déplacements de leurs équipes à cause de nuisances liées à l'eau. Cette base de données porte sur une période allant de mi 2008 à fin 2009. Elle contient l'ensemble des champs suivants :

- *Fuite d'eau sur voie publique*
- *Inondation d'appartement*

- *Inondation de locaux*
- *Inondation terrain par débordement (crue)*
- *Rupture de canalisation d'eau*
- *Véhicule ou matériel dans l'eau*

Cette liste nous informe que les inondations ne sont pas uniquement liées à des problèmes d'eau pluviale, mais peuvent aussi être provoquées par un problème sur le réseau d'admission en eau potable. En effet, d'après cette base de données, le SDIS effectue au moins un déplacement tous les jours de l'année ! La plupart des informations contenues dans cette base ne portent donc pas sur des nuisances liées à des débordements par temps de pluie. En outre, 93,5% des déplacements du SDIS ont pour raisons « inondation d'appartement » ou « inondation de locaux » (fig. 6.8).

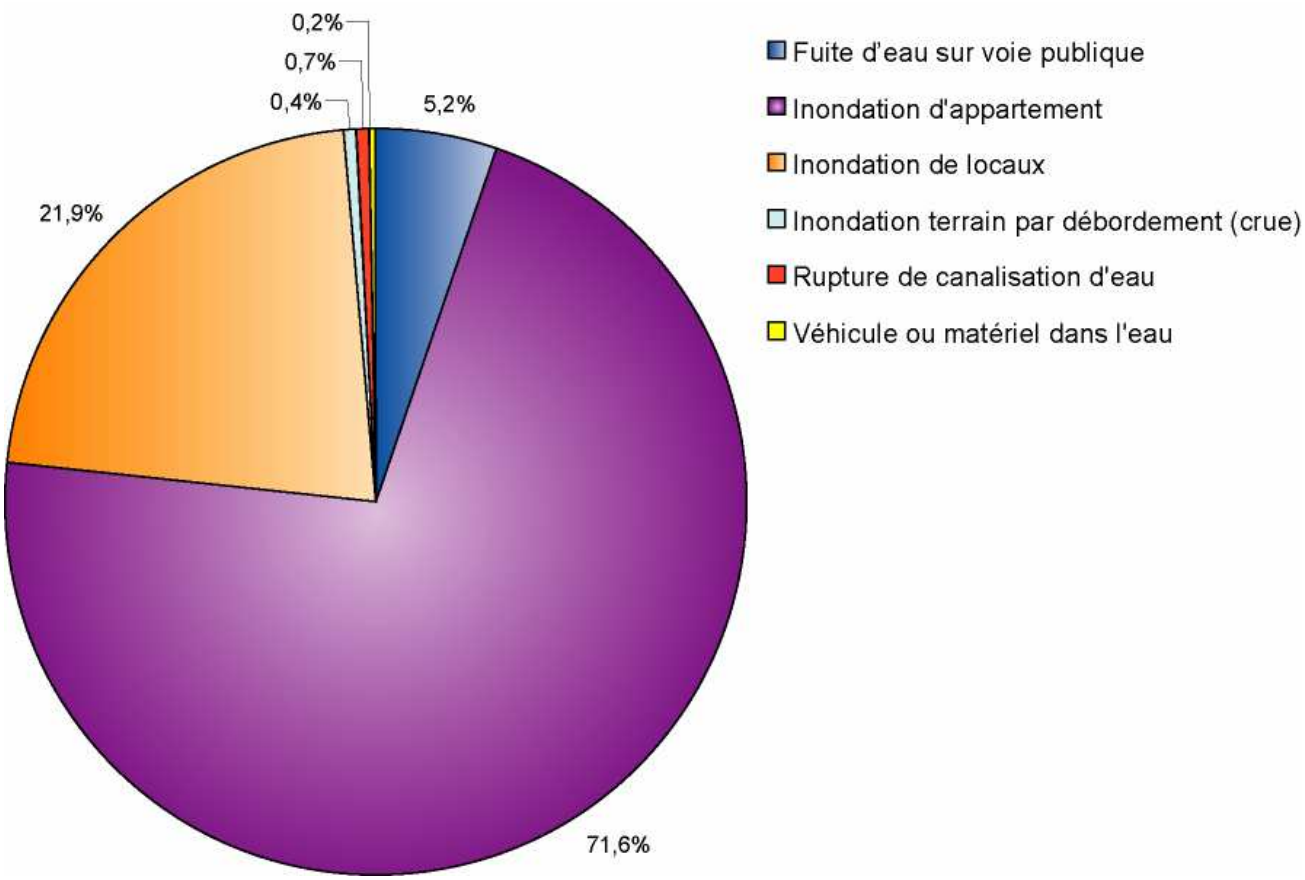


Figure 6.8 : Causes de déplacement du SDIS liées à l'eau contenue dans la base de données fournie pour la période mi 2008-2009

Une exploitation de cette base peut tout de même être faite en confrontant les débordements de la base de données de la Direction de l'eau aux adresses de déplacement du SDIS, pour des épisodes pluvieux précis. Lors de ces événements, la concordance

spatiale entre les informations contenues dans les deux différentes bases de données est encore une fois présente, comme durant l'épisode du 26 juillet 2008 (fig. 6.9).

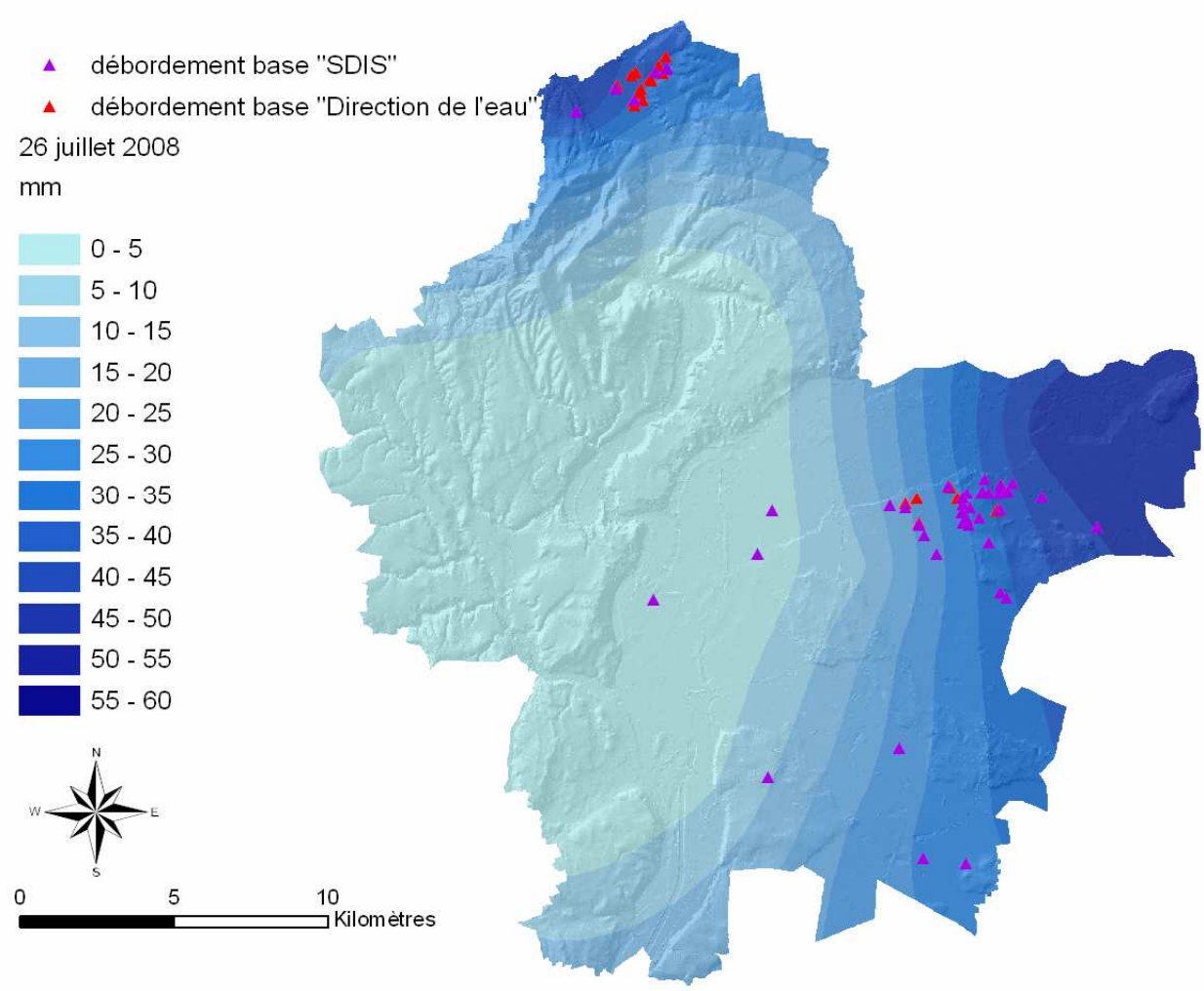


Figure 6.9 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 26 juillet 2008 et débordements associés contenus dans les bases de données de la Direction de l'eau et du SDIS

Au final, les fortes correspondances spatiales entre les différentes bases de données et les hauteurs d'eau cumulées des épisodes permettent de statuer quant à leur fiabilité et à la validité des renseignements contenus. Ainsi, les prochaines paragraphes vont se consacrer à l'exploitation de la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie» de la Direction de l'eau et aux relations entre les nuisances et les types de pluie.

2 Relations entre débordements et types de pluies

Les paragraphes suivants vont se pencher sur l'étude approfondie de la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie» de la Direction de l'eau du Grand Lyon, et plus précisément sur les relations unissant les débordements, les types de pluie et la sensibilité du système d'assainissement.

La confrontation, par épisodes pluvieux, des débordements recensés avec les hauteurs d'eau cumulées, nous a déjà indiqué que les nuisances se localisent précisément dans les zones les plus fortement touchées par les pluies (cf. fig. 6.2 à 6.7 et 6.9). Cela peut sembler respecter le bon sens, mais cette hypothèse restait à vérifier concrètement et spatialement. En effet, étant donné la complexité du système d'assainissement et sa longueur, il aurait pu être possible de constater des débordements en aval du réseau, dans une zone épargnée par des pluies. Ce premier constat établi, la distribution spatiale et la répartition temporelle de ces débordements va être analysée, avant de passer aux interactions entre les types de pluies et les types de débordements. Cette étude sera menée sur la période 1988-2005, afin de rester synchrone avec la sélection de pluies remarquables qui a été faite dans les chapitres précédents, et qui sera à nouveau utilisée ultérieurement dans ce chapitre.

2.1 Des distributions spatiales et des répartitions temporelles prévisibles

Globalement, il peut être constaté que les débordements du réseau d'assainissement se situent sur l'ensemble de l'agglomération, à l'exception de deux communes épargnées du nord et de l'est lyonnais : Montanay et Jonage (fig. 6.10). Ces absences de débordements sur ces deux communes peuvent être interprétées de deux manières. En effet, nous

pouvons voir ici une des limites de la non exhaustivité de la base de données « débordements », ou le signe que le réseau est très performant dans ces deux communes (après discussions avec les gestionnaires locaux de la commune de Jonage, il apparaîtrait que ce soit en effet le cas).

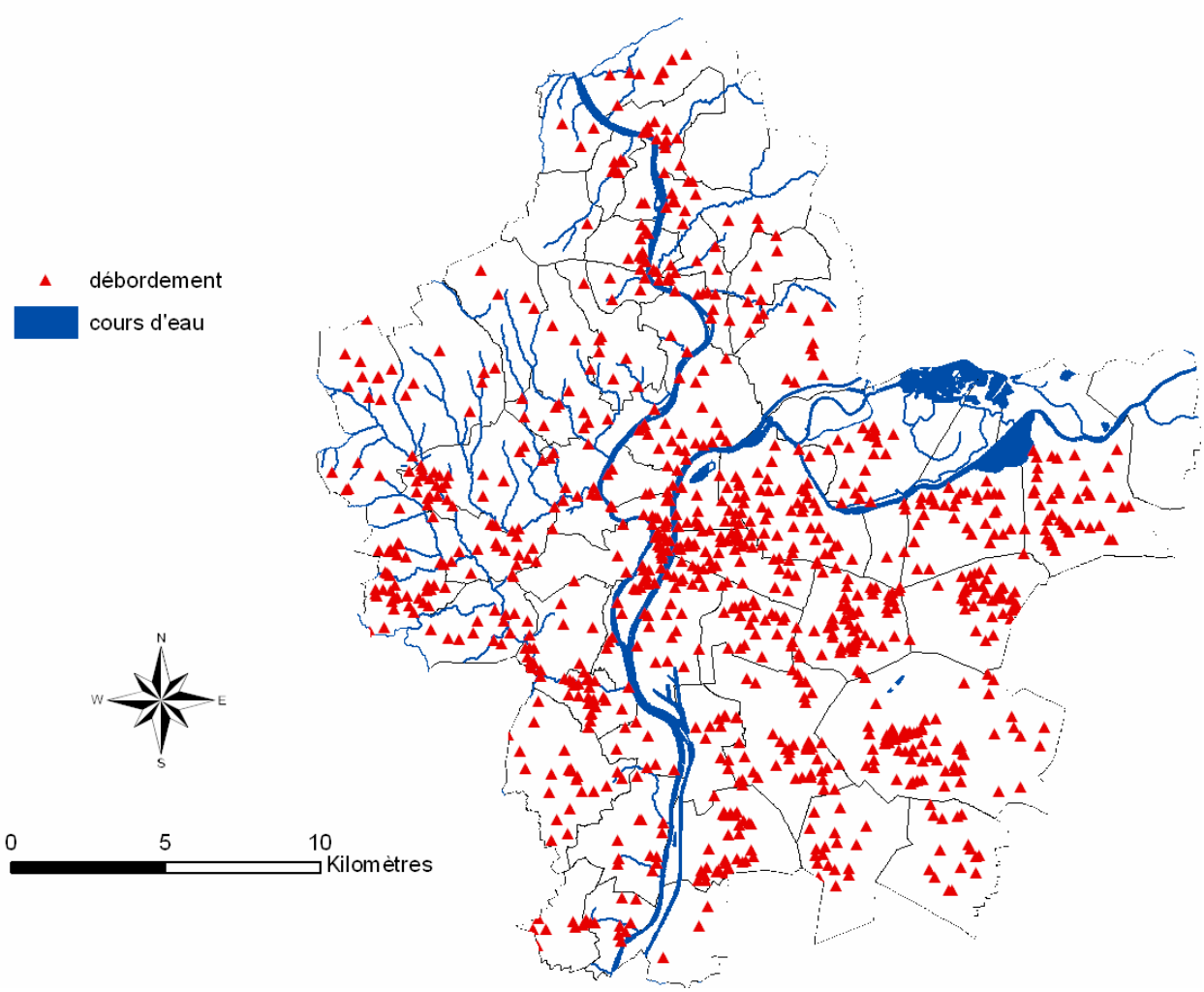


Figure 6.10 : Débordements recensés du réseau d'assainissement du Grand Lyon (période 1988-2005)

Une analyse plus fine de la distribution des nuisances peut être faite à l'échelle communale, en rapportant les débordements à la superficie de la commune ou à la longueur de réseau d'assainissement de chacune des communes (fig. 6.11 à 6.13).

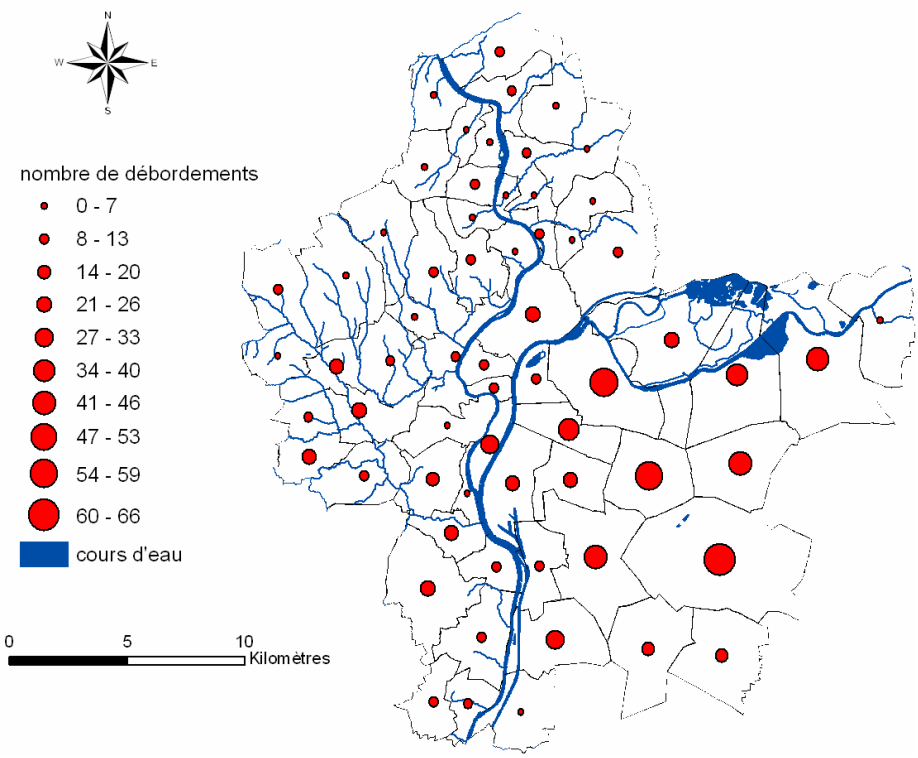


Figure 6.11 : Débordements recensés par communes du Grand Lyon (période 1988-2005)

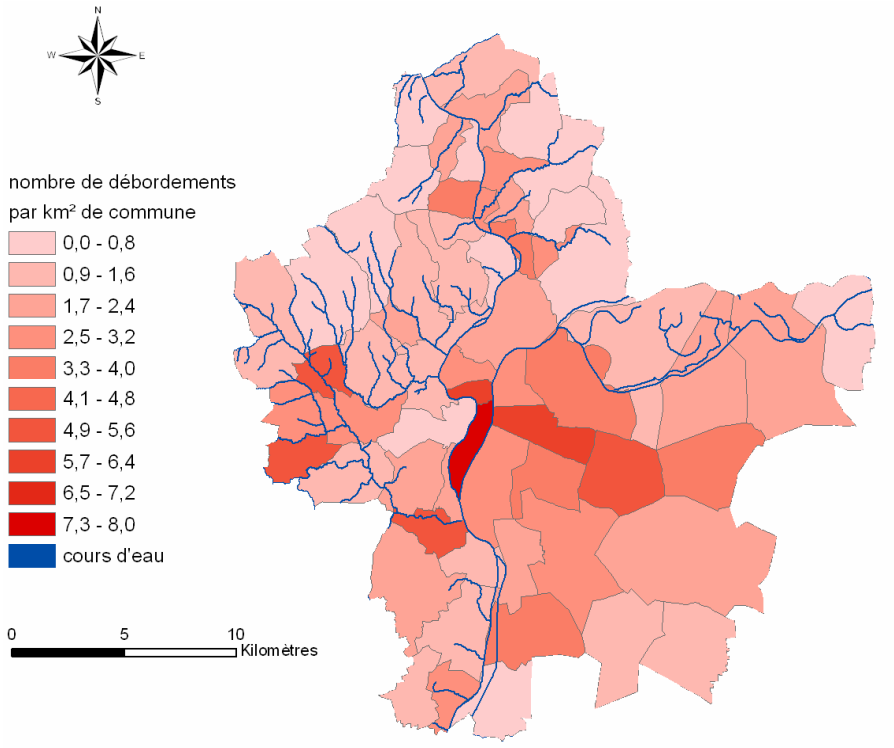


Figure 6.12 : Débordements recensés par superficie des communes du Grand Lyon (période 1988-2005)

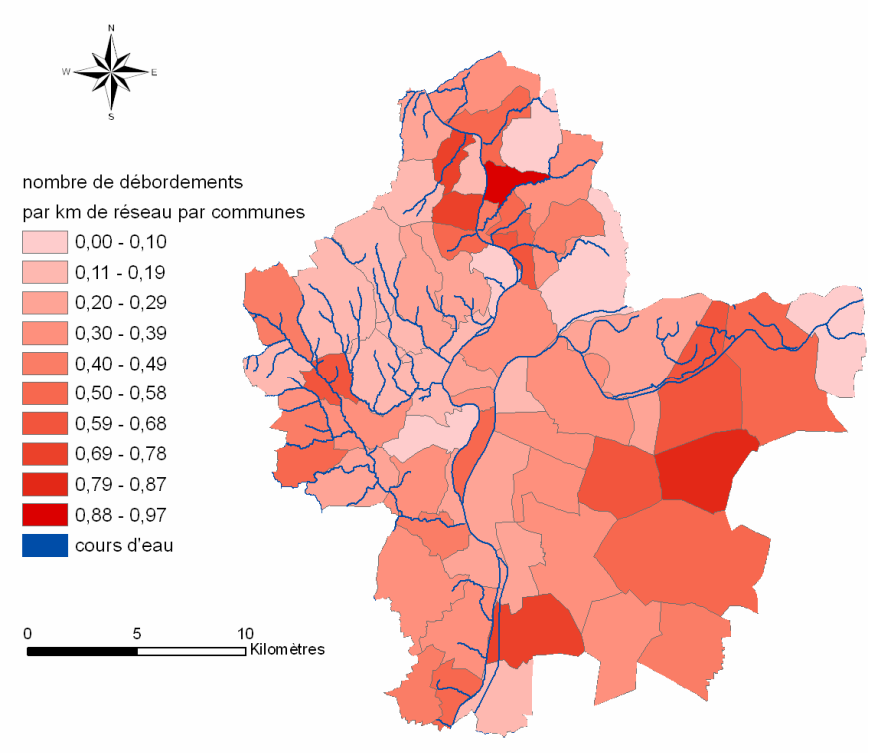


Figure 6.13 : Débordements recensés par longueur de réseau d'assainissement par communes du Grand Lyon (période 1988-2005)

Cependant, ces analyses fournissent des résultats différents selon à ce que l'on s'intéresse aux débordements par communes, par superficie de communes, ou par longueur de réseau par communes. Par exemple, la commune de Saint-Priest dans l'est lyonnais concentre beaucoup de débordements avec 66 occurrences pendant la période 1988-2005 et ressort comme une des communes les plus touchées sur la figure 6.11 qui matérialise le nombre de débordements par communes. Or, lorsque l'on s'intéresse aux nombres de débordements par superficie de la commune, Saint-Priest et ses 30 km² n'apparaît plus du tout comme une des communes les plus touchées (fig. 6.12). Et si l'on s'intéresse aux occurrences des débordements par longueur de réseau d'assainissement par communes, Saint-Priest remonte à la dixième place des communes les plus touchées (fig. 6.13). Ce type d'analyse reste donc contraint par les limites communales. « Le territoire de l'aléa et a fortiori du risque ne coïncide pas avec les limites administratives » (Veyret Y. et Reghezza M., 2005). Ce phénomène est un exemple des effets du MAUP (*Modifiable Areal Unit Problem* - Oliveau, 2010 ; Openshow et Taylor, 1979 ; Wong et Amrhein, 1996) et nuit à l'analyse globale des débordements (les limites communales ne correspondant en rien à la distribution des phénomènes pluvieux).

Ainsi, pour s'affranchir de ces limites administratives, nous avons réalisé des cartes de densité de débordements qui prennent en compte toutes les observations sur tout le territoire

du Grand Lyon (Silverman, 1986). La carte de densité des débordements observés entre 1988 et 2005 indique que la zone la plus touchée par les débordements se situe dans le centre urbain du Grand Lyon (Lyon, Villeurbanne), et une partie de la plaine de l'est (Bron notamment), avec des densités avoisinant les cinq débordements recensés par kilomètre carré (fig. 6.14).

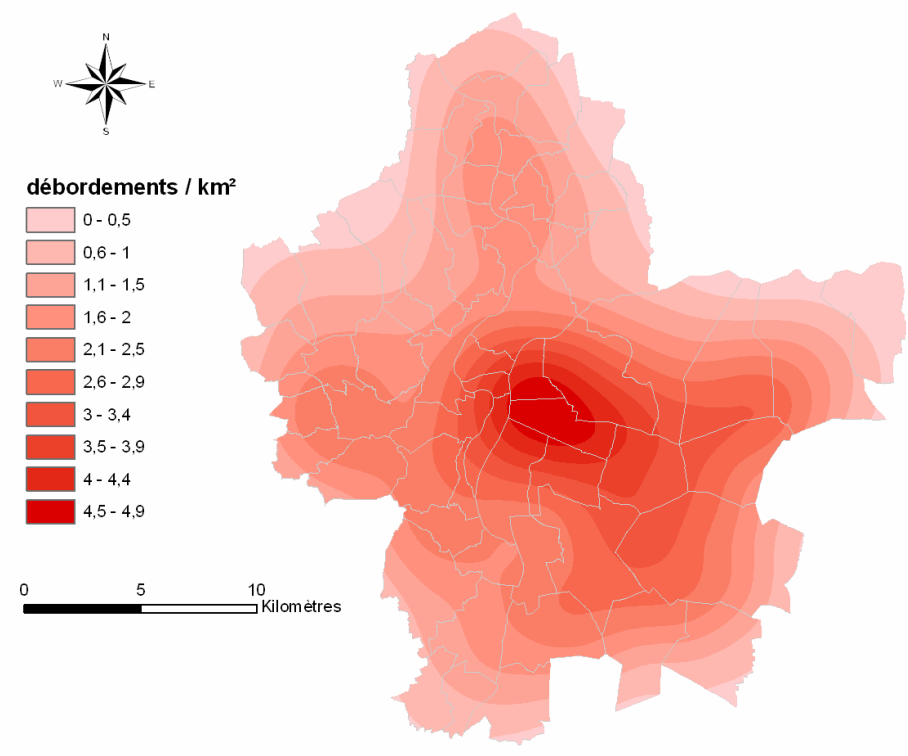


Figure 6.14 : Densité de débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon (période 1988-2005)

Nous venons de constater que ces débordements ne se répartissent pas uniformément d'une manière spatiale. Il en est de même d'une manière temporelle à l'échelle annuelle (fig. 6.15). En effet, nous constatons une hausse de débordements durant les mois d'été (de juin à septembre). Il peut notamment être constaté un pic pour le mois de juin, qui totalise 391 débordements sur les 1278 recensés sur la période 1988-2005 (soit 30,5%). Cependant, il peut être remarqué le faible nombre de débordements répertoriés sur les mois de juillet avec seulement 79 constats (et dans une moindre mesure sur les mois d'août) au regard des mois de juin. Il s'agit sans nul doute de la mise en lumière d'une autre des limites inhérentes à cette base. En effet, cette dernière repose sur le constat d'équipe de personnels de terrain, et les mois de juillet et d'août fonctionnent avec des effectifs restreints à cause des vacances, ce qui peut expliquer cette diminution d'occurrences de débordements.

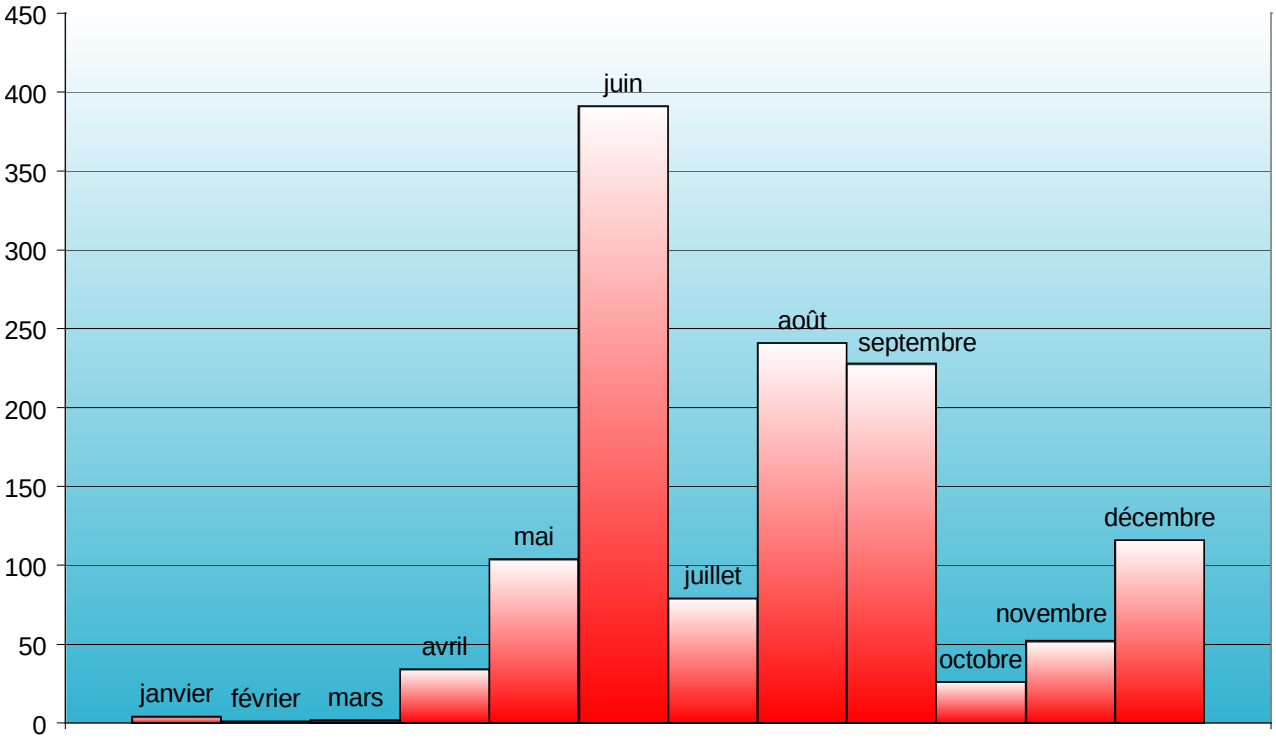


Figure 6.15 : Répartition temporelle annuelle des débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon (période 1988-2005)

Les débordements, fortement corrélés spatialement aux hauteurs d'eau des épisodes pluvieux, se situent principalement dans le cœur urbain de l'agglomération (fig. 6.14). En outre, la majorité se situe en été. Ils vont donc maintenant être mis en parallèle avec l'aléa pluvial du Grand Lyon, notamment le type et la répartition spatiale et temporelle des épisodes pluvieux. Les débordements vont aussi être confrontés à la nature du système d'assainissement, comme le type d'ouvrage en cause lors du débordement, ou encore le type de réseau. Ces études sont développées dans les prochains paragraphes de ce texte, en commençant par une analyse des débordements par le biais de l'aléa, puis en continuant par celle de la sensibilité du réseau.

2.2 Quels débordements pour quels types de pluies ?

Une sélection de pluies remarquables fondées sur leurs caractéristiques physiques a été effectuée dans les chapitres précédents. Cette sélection de pluies obtenue par une ACP porte sur la période 1988-2005. Elle contient un échantillon des 25 pluies les plus intenses

en 18 minutes, des 25 pluies les plus abondantes en termes de hauteur d'eau totale précipitée, et des 25 pluies les plus longues. Cependant, 10 pluies retenues avaient en commun de figurer parmi les plus longues et les plus abondantes. Au final, nous avons donc un échantillon de 65 pluies remarquables lyonnaises en termes d'intensité, de hauteur d'eau précipitée et de durée. Ce choix, discriminant, peut paraître subjectif, mais a été pour partie conditionné par des objectifs opérationnels. En effet, pratiquement toutes les occurrences de débordements du réseau d'assainissement correspondent aux épisodes remarquables sélectionnés (tableau 6.1 à 6.3).

05/07/1993	non
09/09/2002	non
29/06/1993	oui
01/07/1993	oui
04/08/2004	oui
14/05/1988	non
31/07/1994	non
08/08/1995	non
10/06/2000	oui
30/06/1997	oui
07/09/1995	oui
23/07/2004	oui
12/05/1993	oui
21/08/1992	oui
19/09/2002	oui
08/06/1996	non
24/08/1995	non
29/07/2005	non
29/07/1990	oui
16/06/1988	non
29/07/1996	oui
07/08/1997	oui
12/05/1995	non
20/08/2000	oui
10/06/1994	oui

Tableau 6.1 : Sélection de pluies remarquables en termes d'intensité et occurrences de débordements

01/12/2003	oui
15/04/2005	oui
22/09/1993	non
12/11/1996	non
22/10/1999	oui
28/09/1991	non
23/11/2002	oui
07/10/1993	non
04/10/1995	non
14/07/2001	non

01/05/2002	non
21/06/1997	non
25/10/2004	oui
05/07/1999	non
12/09/1995	oui
07/07/1996	non
05/10/1993	non
12/09/1994	non
05/11/1994	non
17/08/2004	oui
18/05/1996	non
03/11/1989	non
13/03/2004	oui
12/10/2000	non
25/04/1989	non

Tableau 6.2 : Sélection de pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée et occurrences de débordements

15/04/2005	oui
01/05/2002	non
07/10/1993	non
01/12/2003	oui
23/11/2002	oui
25/04/1989	non
07/07/1996	non
26/03/1999	non
12/09/1995	oui
07/04/2005	oui
15/10/1996	non
22/09/2001	non
28/09/1991	non
16/07/2002	non
29/09/1988	non
10/05/1989	non
21/06/1997	non
25/11/1996	non
16/10/2002	oui
24/10/1999	non
28/10/1990	non
20/11/1990	non
10/10/1988	oui
10/06/1992	non
18/09/1995	non

Tableau 6.3 : Sélection de pluies remarquables en termes de durée et occurrences de débordements

Par ailleurs, afin de compléter cette base d'événements, une sélection de pluies que l'on peut qualifier d'ordinaires a été effectuée sur des critères non pas physiques, mais de

nuisances observées. Ainsi, les pluies à l'origine de débordements recensés dans la base de données, mais ne figurant pas parmi les pluies remarquables, constituent l'échantillon de pluies ordinaires. Un échantillon de 13 pluies ordinaires se dégage donc, ayant provoqué des débordements mais ne possédant pas de caractères physiques remarquables pour la région lyonnaise, et vient ainsi compléter l'échantillon précédemment retenu (tableau 6.4). Au total, c'est donc un échantillon de 78 pluies (65 exceptionnelles et 13 ordinaires) qui va être mis en relation avec les débordements constatés sur l'agglomération lyonnaise.

22/05/1992
01/06/1992
17/06/1992
22/08/1993
01/11/2002
31/10/2003
03/08/2004
09/08/2004
10/08/2004
19/08/2004
20/08/2004
24/08/2004
26/09/2005

Tableau 6.4 : Sélection de pluies ordinaires (ne figurant pas dans la liste des pluies remarquables) mais durant lesquelles des débordements ont été constatés

Cette discrimination du type de pluie permet de mettre en relation les débordements avec la nature de la précipitation (figure 6.16). Nous constatons que 60% des débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon de la période 1988-2005 sont provoqués par des pluies remarquables en termes d'intensité moyenne en 18 minutes. Les pluies remarquables en termes de hauteur totale moyenne d'eau précipitée et de durée ont provoqué 20% des débordements recensés, et les pluies ordinaires en sont responsables de 20% aussi. Il peut dorénavant être remarqué la part prépondérante des pluies remarquablement intenses dans l'origine des débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon. Ainsi, il est maintenant nécessaire de voir si la répartition de ces débordements liés à ces épisodes intenses se distribue d'une manière homogène sur le territoire du Grand Lyon, ou au contraire si ces débordements n'ont rien d'uniforme et se focalisent sur certaines portions précises du réseau d'assainissement.

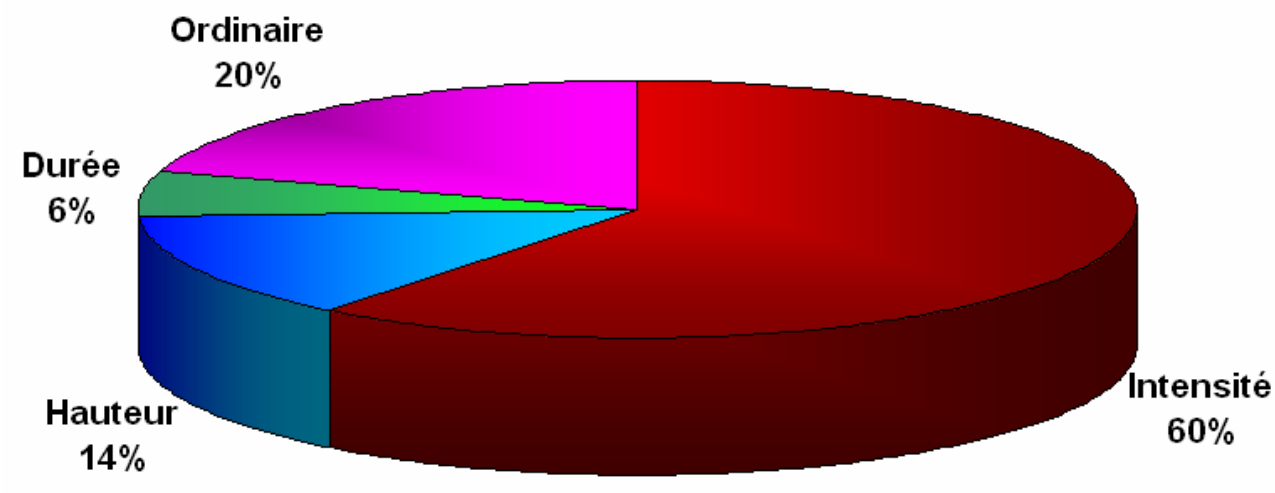


Figure 6.16 : Typologie des pluies à l'origine des débordements : remarquables en termes d'intensité, de durée, de hauteur d'eau précipitée ou ordinaires

2.3 L'influence des types de pluie dans la localisation des débordements

Précédemment, nous avons constaté que les différents types de pluies provoquaient quantitativement des types de débordements différents. Ainsi, les pluies remarquables en termes d'intensité moyenne en 18 minutes sont à elles seules à l'origine de 60% des débordements recensés. Mais qu'en est-il d'un point de vue de la distribution spatiale de ces débordements ? Afin d'étudier la répartition dans l'espace des différents débordements en fonction du type de pluie, nous avons réalisé des cartes de densité de débordements. Seulement cette fois-ci, à la différence du cas précédent où tous les débordements sans discrimination avaient été utilisés pour générer la carte globale, nous avons ici utilisé séparément les débordements ayant été provoqués par les pluies remarquables en termes d'intensité, de hauteur totale moyenne d'eau précipitée, de durée, ou par les pluies ordinaires. Il a donc été produit quatre cartes de débordements en fonction du type de pluies qui en était à l'origine, et leur exploitation fait l'objet des paragraphes suivants. Mais auparavant, il convient de repréciser que les hauteurs d'eau précipitées des épisodes pluvieux remarquables (et ordinaires) se répartissent aléatoirement sur tout le territoire de la communauté urbaine (cf. chapitres précédents). Les différences observées sont donc dues au réseau d'assainissement et à ses composantes qui réagissent différemment en fonction du type de pluie (tel que défini précédement).

2.3.1 *Les débordements durant les pluies intenses affectent le centre de l'agglomération*

Les débordements provoqués lors de pluies remarquablement intenses ne se répartissent pas uniformément sur le Grand Lyon. Ils se situent surtout dans le centre urbain et l'est lyonnais, ainsi que plus légèrement sur le bassin versant de l'Yzeron, avec des densités atteignant trois débordements par kilomètre carré (fig. 6.17 a et 6.17 b). À l'échelle temporelle de l'épisode pluvieux intense, on assiste à une très forte corrélation entre la hauteur d'eau précipitée et les débordements du réseau d'assainissement, pour chacun des épisodes, comme par exemple le 29 juin 1993 ou le 07 août 1997 (fig. 6.2 et 6.3). Nous avons vu que cette très forte corrélation spatiale permet de valider la fiabilité des renseignements contenus dans la base de données, et en retour la fiabilité des interpolations spatiales issues du réseau de mesure au sol du Grand Lyon.

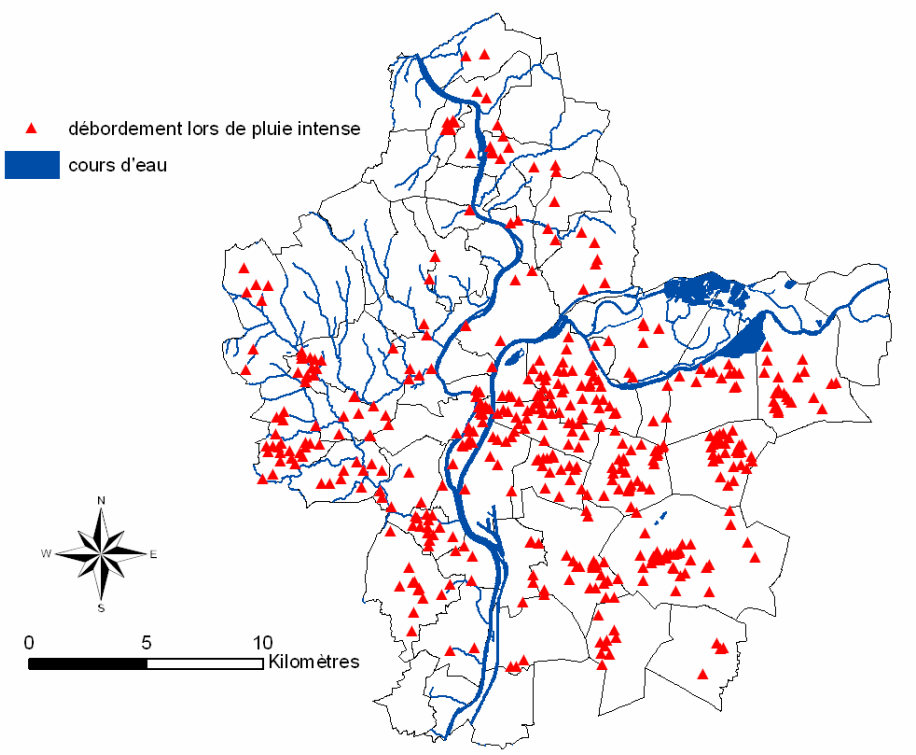


Figure 6.17 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes d'intensité

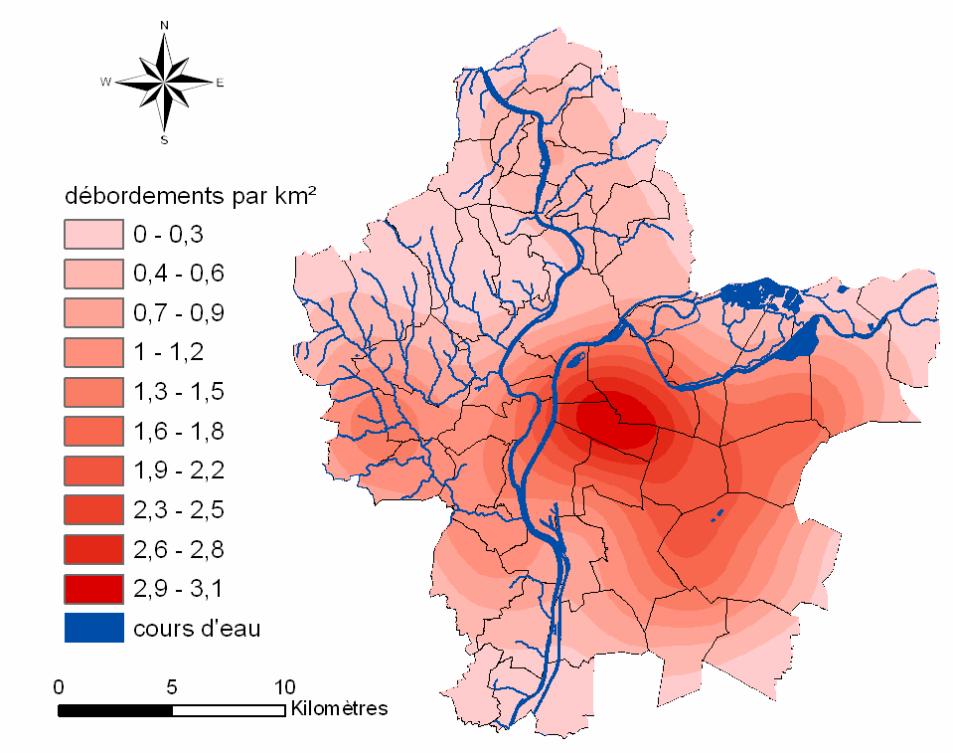


Figure 6.17 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes d'intensité

2.3.2 L'ouest du Grand Lyon est touché par les pluies abondantes et longues

À l'opposé des débordements provoqués par les pluies intenses, les densités de débordements maximales issues des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau et de durée se situent en majorité sur l'ouest lyonnais, notamment sur le bassin versant de l'Yzeron, avec des densités de débordements moindres cependant (fig. 6.18 a et b et 6.19 a et b). En effet, les densités maximales relevées sur ce bassin versant sont de 0,87 débordements par kilomètre carré, ce qui s'explique par le fait que les pluies remarquablement abondantes et longues ne sont à l'origine que de 20 % des débordements totaux.

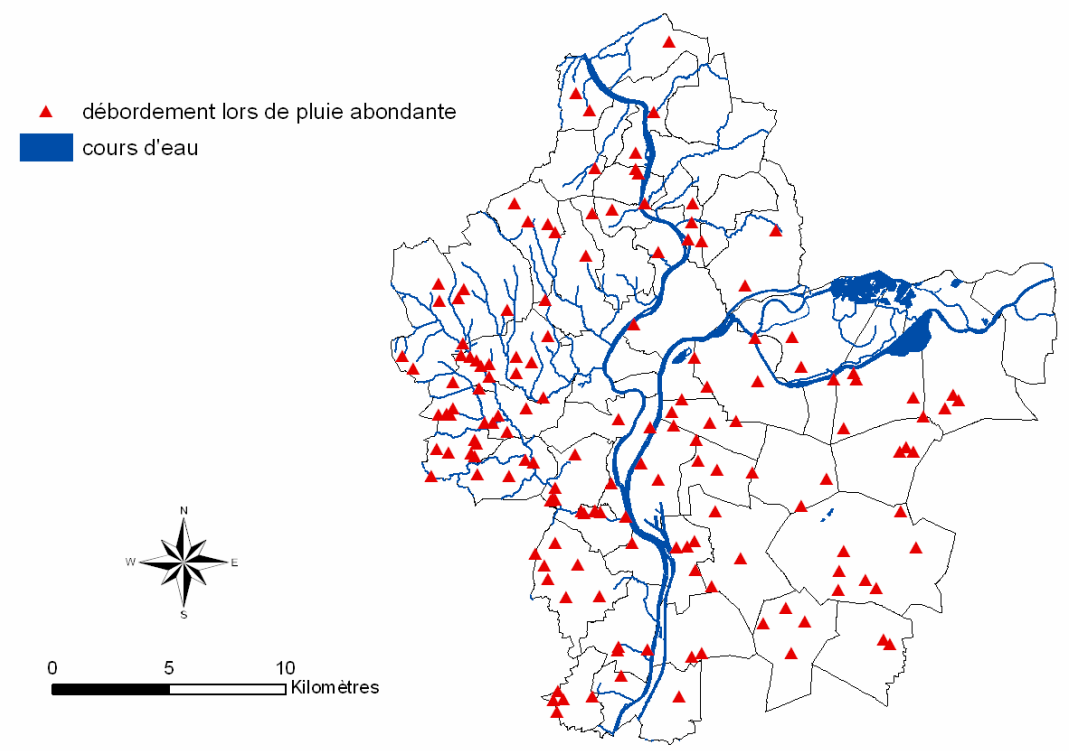


Figure 6.18 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée

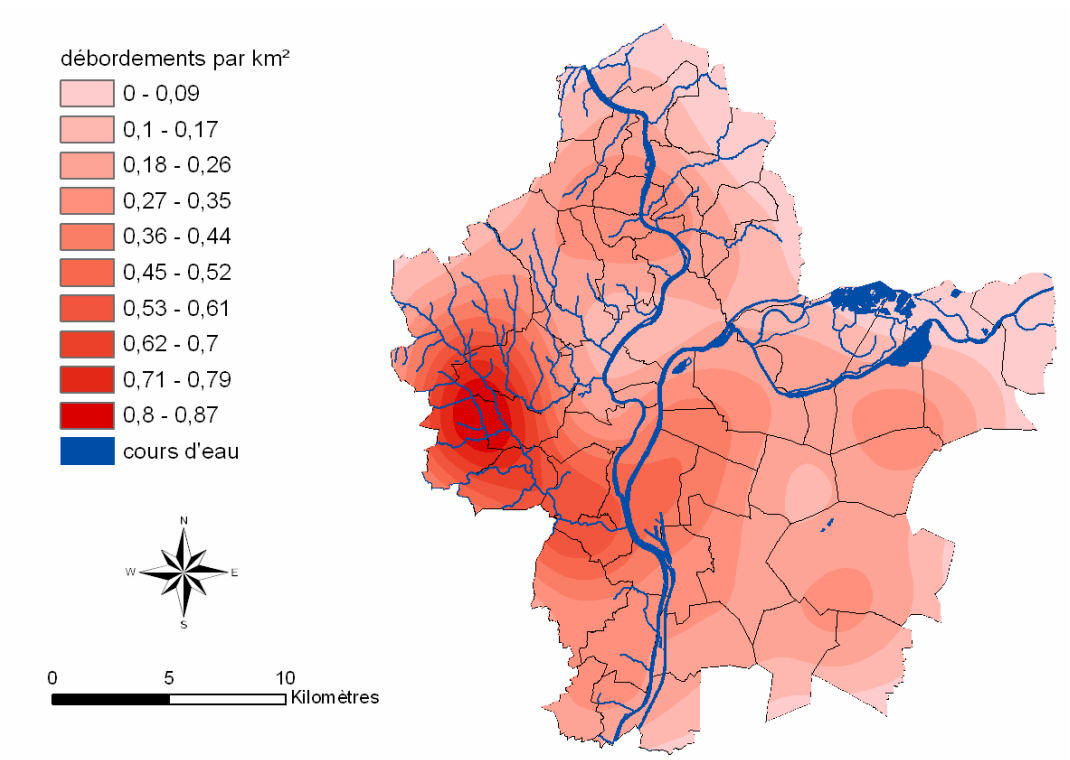


Figure 6.18 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée

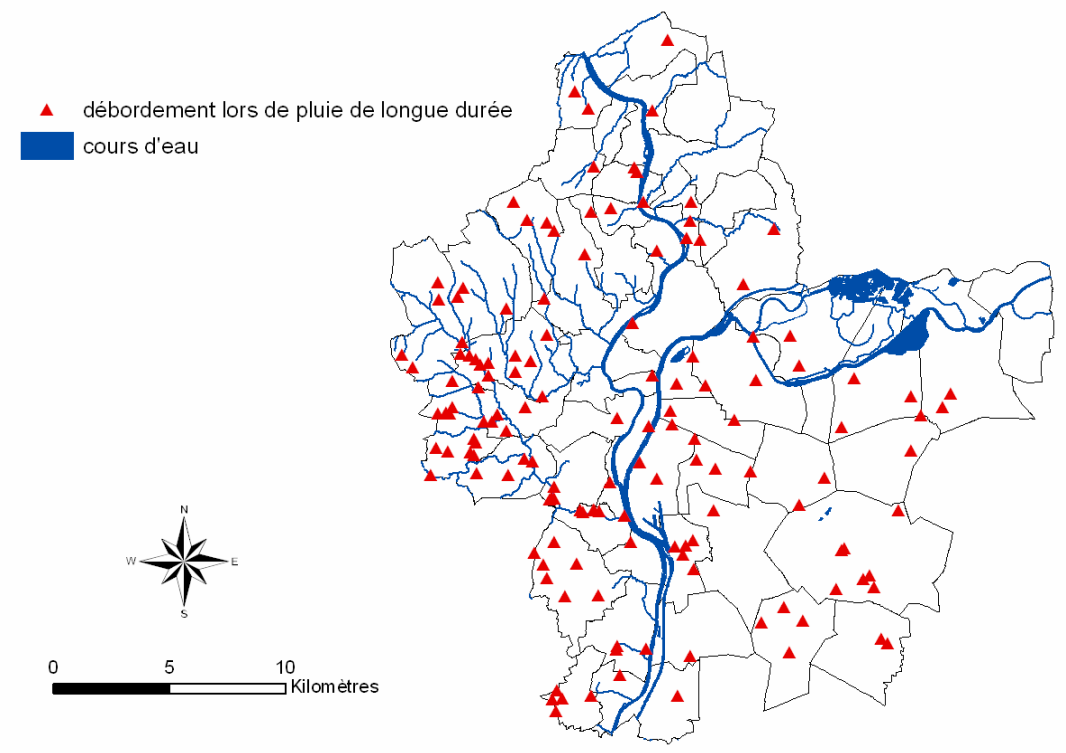


Figure 6.19 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de durée

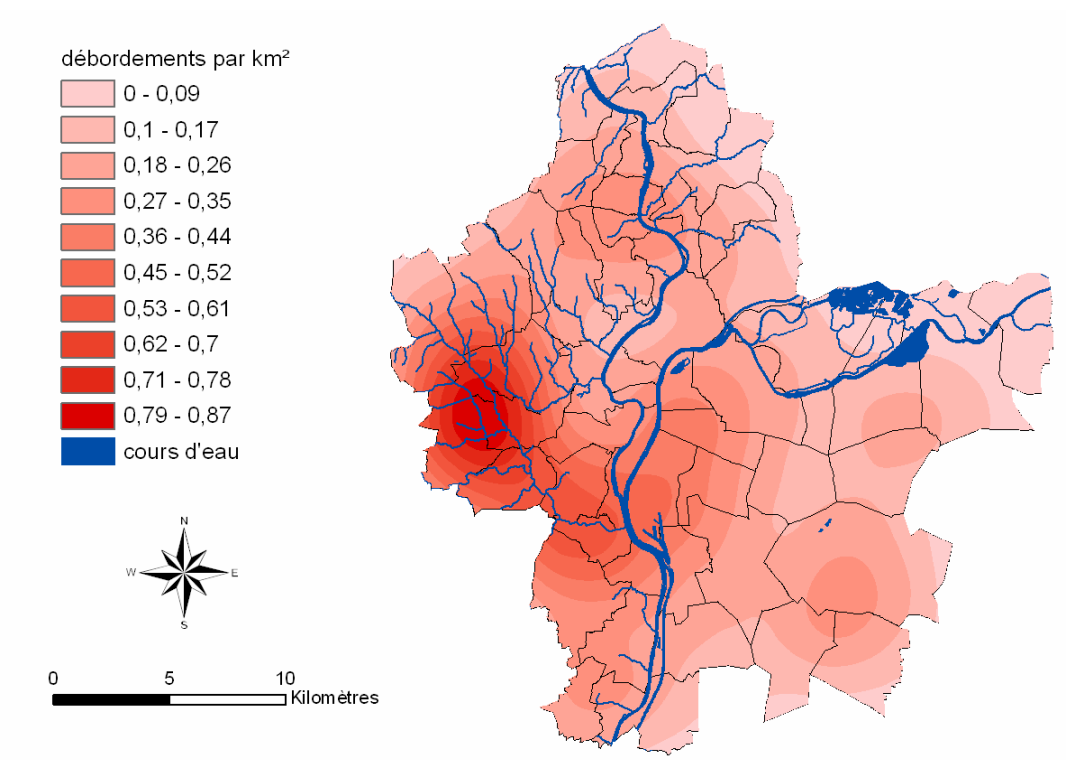


Figure 6.19 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de durée

2.3.3 Les débordements de pluies ordinaires se concentrent à l'est

Les débordements provoqués par les pluies de l'échantillon « ordinaire » se trouvent quant à eux centrés presque exclusivement sur la plaine de l'est lyonnais, avec des densités légèrement supérieures à un débordement par kilomètre carré (fig. 6.20 a et b).

À l'aide d'une analyse poussée des commentaires de la base de données et des données pluviométriques, on met ici en évidence que ces débordements issus de pluies ordinaires sont particulièrement liés à la sensibilité du réseau. Par exemple, les précipitations du 19 août 2004 n'atteignent qu'une dizaine de millimètres sur l'est lyonnais, mais provoquent néanmoins une dizaine de débordements (fig. 6.21). Cela s'explique par le fait qu'une des pluie remarquable en termes de hauteur d'eau précipitée était tombée sur la communauté urbaine deux jours avant. De ce fait, la base de données nous apprend que le réseau (et le sol) était préalablement saturé avant l'arrivée de la faible pluie du 19 août, ce qui a conduit malgré tout à ces débordements. Des commentaires de la base confirment cette explication en mentionnant la saturation des canalisations et des puits d'infiltration par la pluie précédente.

Il en est de même par exemple avec la pluie du 1er novembre 2002 qui a totalisé environ 10 mm de précipitation et a pourtant provoqué une dizaine de débordements. Dans ce cas, la base de données nous apprend que ceux-ci sont dus à des feuilles d'arbres qui obstruaient les entrées d'eau dans le réseau (fig. 6.22). Ici, il semble donc que ce soit la vulnérabilité du réseau d'assainissement qui soit en cause (saturation préalable du réseau ou gestion difficile), et non l'aléa pluvial (hauteur d'eau précipitée très faible).

Le risque de débordement associé aux pluies ordinaires peut être alors schématisé par un diagramme sagittal (Rome, 2006 et 2008 ; Dauphiné, 2003 ; D'Ercole, 1994 - fig. 6.23). Pour un aléa relativement faible (par exemple la pluie du 19 août 2004 cumulant seulement 10 mm environ), c'est bien la forte vulnérabilité du réseau d'assainissement (réseau préalablement saturé, puits d'infiltration colmatés, etc.) qui rend le risque de débordement fort.

Les zones touchées par les débordements varient donc en fonction du type d'aléa pluvial qui les provoque. Cependant, trouve t-on ce même genre de constat lorsque l'on s'intéresse à la sensibilité des différents composants du système d'assainissement ?

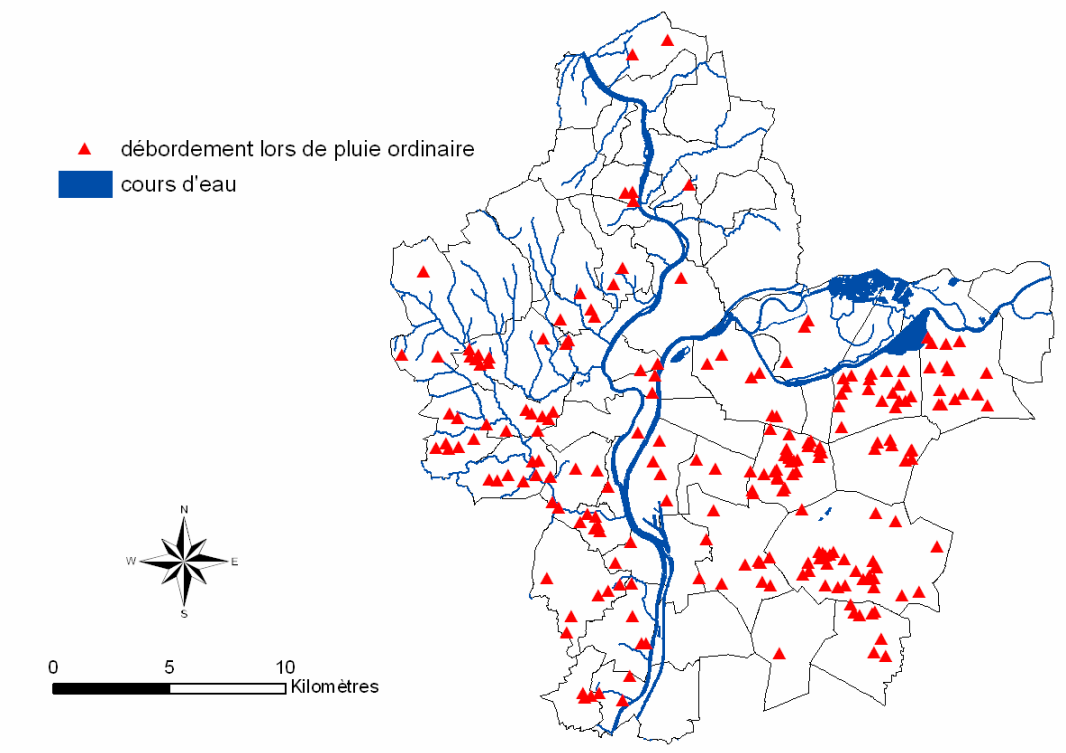


Figure 6.20 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies ordinaires

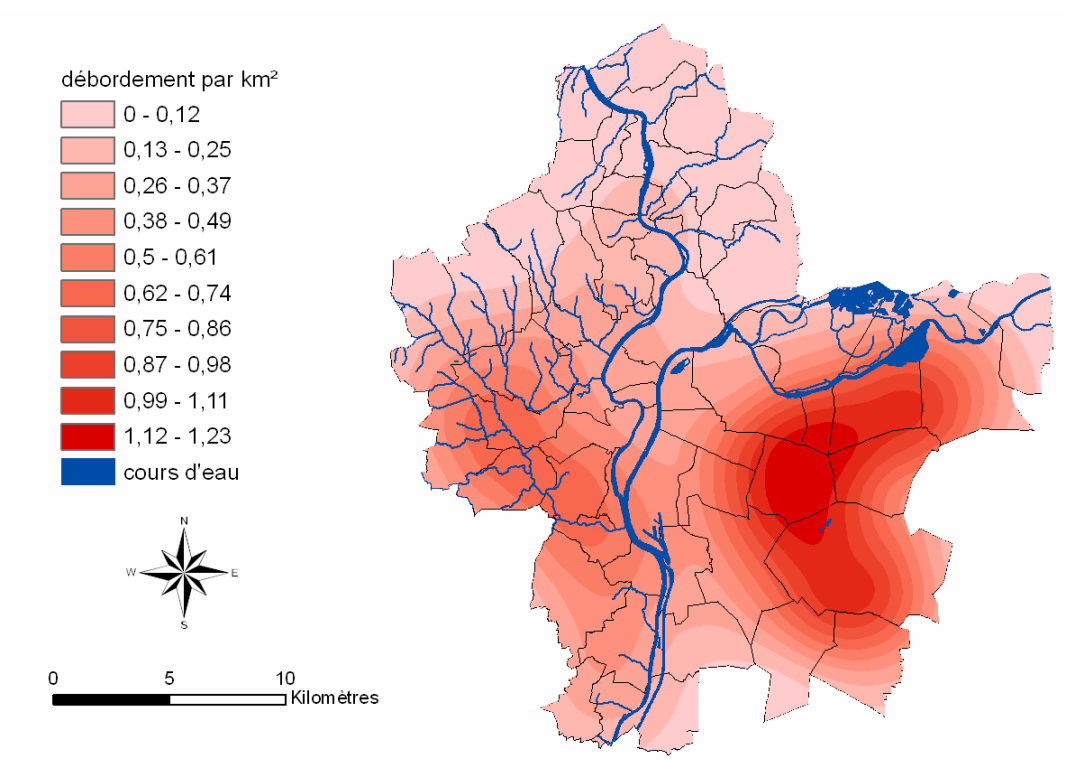


Figure 6.20 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies ordinaires

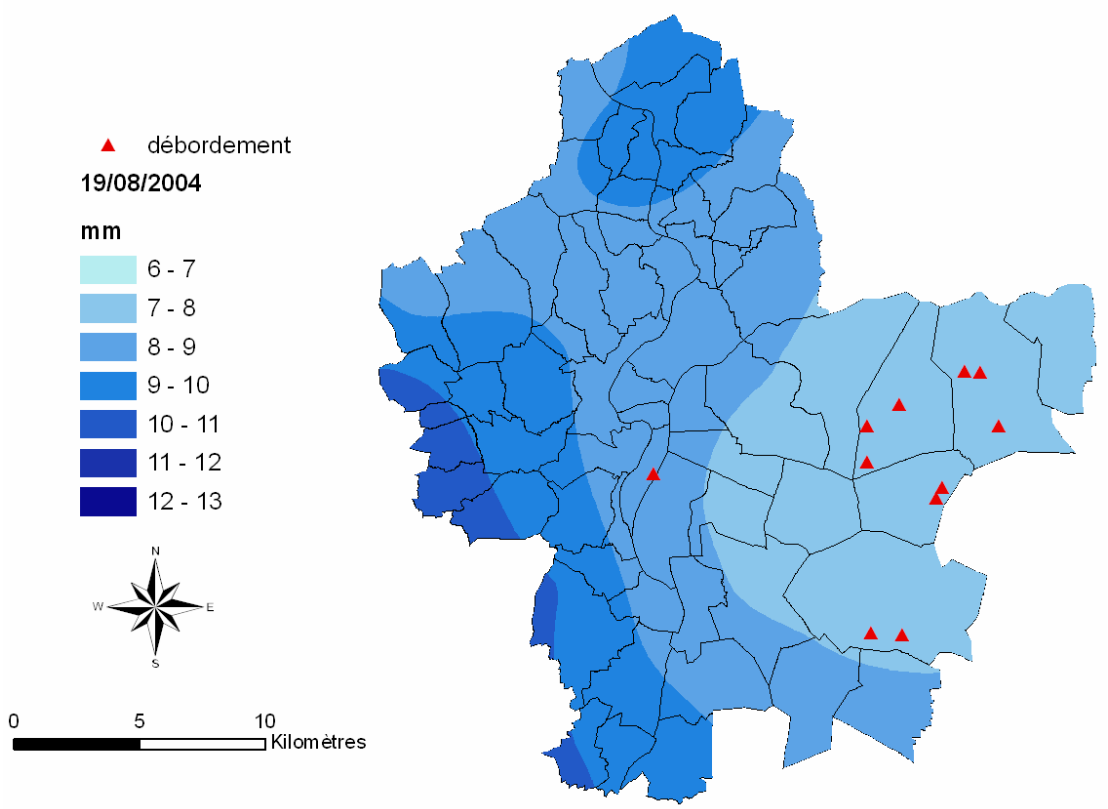


Figure 6.21 : Hauteur d'eau précipitée lors de l'épisode du 19 juillet 2004 et débordements associés

Figure 6.22 : Avaloir complètement obstrué par des feuilles et de la terre (à gauche) puis sommairement dégagé (à droite), sur le domaine universitaire de la Doua, Villeurbanne (cliché : D. Granger (Granger, 2009))

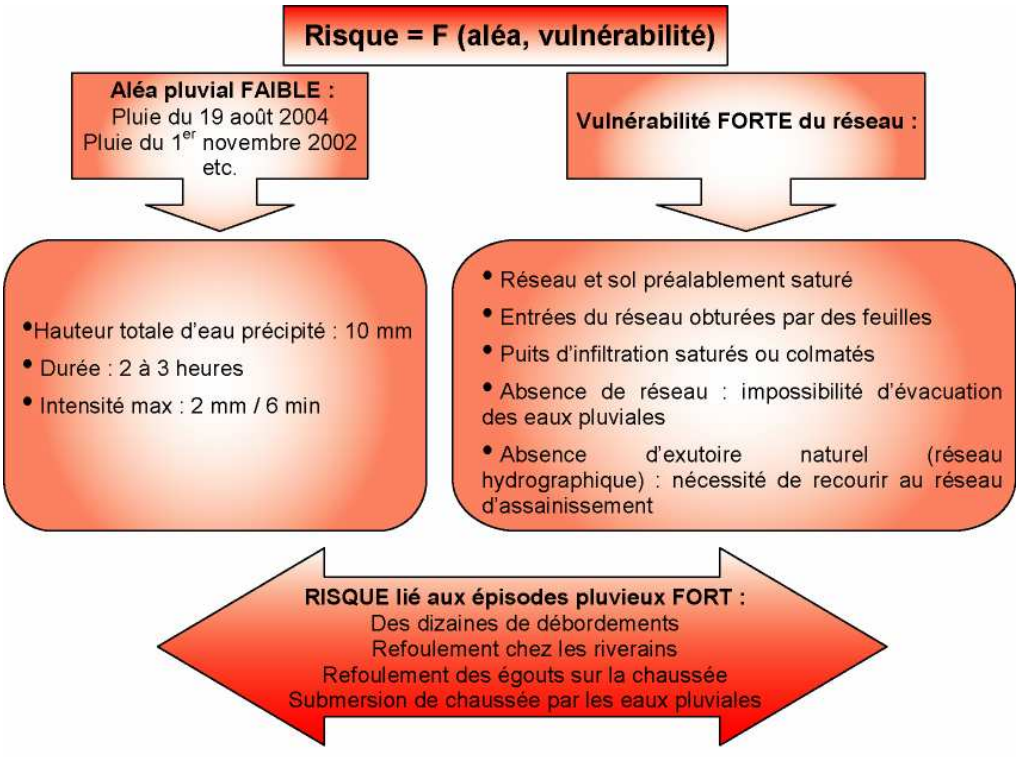


Figure 6.23 : Etude du risque lié aux pluies ordinaires sur le Grand Lyon

2.4 L'influence notable des composants du système dans la localisation des débordements

2.4.1 Quantification et distribution spatiale des débordements en fonction du type de réseau

Le réseau d'assainissement du Grand Lyon n'est pas homogène. En effet, le réseau unitaire se concentre dans le centre lyonnais, alors que le réseau séparatif (pluvial et usé) se trouve plutôt en périphérie d'agglomération. Ainsi, à l'aide de la base de données, il apparaît que le réseau unitaire rassemble 62% des débordements recensés sur la période 1988-2005 (fig. 6.24). Le réseau d'eau pluviale et le réseau d'eau usée rassemblent quant eux respectivement 6% et 19% des débordements, alors que 13% des inondations restantes observées sont dues à un problème d'absence de réseau.

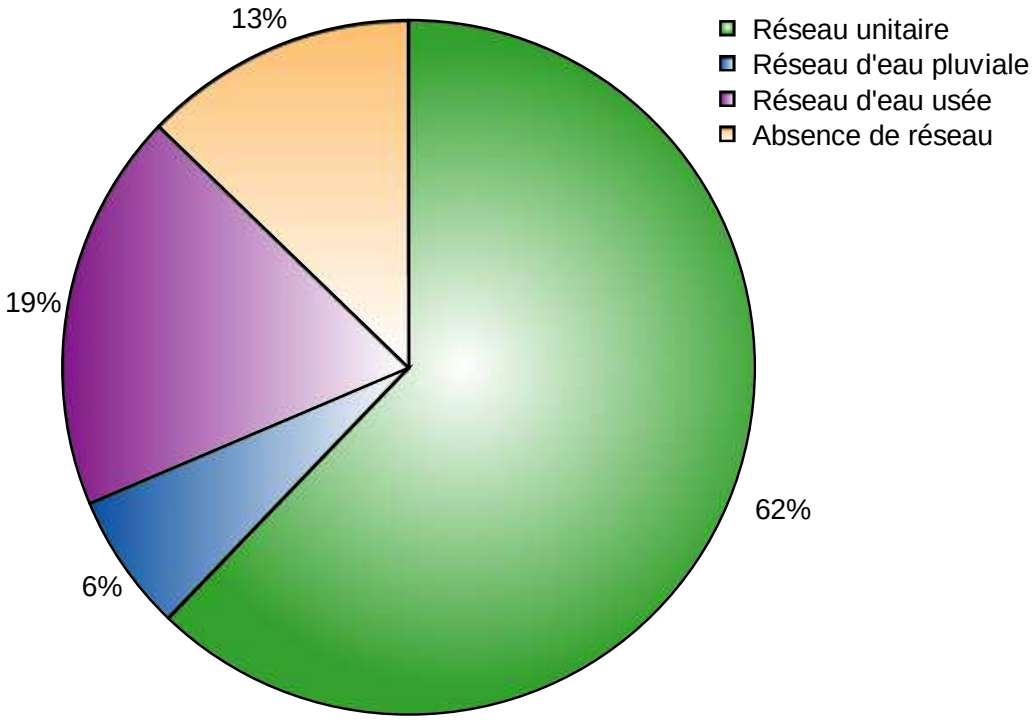


Figure 6.24 : Origine des débordements en fonction du type de réseau

Il convient pourtant de relativiser la part des débordements sur chacun des types de réseau. En effet, ces réseaux n'ont ni la même distribution dans l'agglomération, ni la même longueur. Ainsi, en rapportant le nombre de débordements à la longueur de chacun des réseaux, nous n'obtenons plus les mêmes disproportions que précédemment en faveur du réseau unitaire, mais approximativement le même ratio de débordements par kilomètre de type de réseau. Le réseau unitaire reste toutefois le plus touché avec une valeur légèrement supérieure aux réseaux séparatifs, sans surprise et à la satisfaction du gestionnaire. Ce dernier serait victime de 0,36 débordement par kilomètre, alors que les réseaux d'eau usée et d'eau pluviale rassembleraient respectivement 0,24 et 0,22 débordement par kilomètre (fig. 6.25). Il est légitime de s'étonner quant aux débordements du réseau d'eau usée, qui, en toute théorie, ne devrait déborder ni par temps de pluie, ni par temps sec. Ce biais s'explique par le fait que seul le type administratif de réseau est recensé, c'est à dire ce qui est supposé se trouver à l'intérieur des canalisations, et non ce qui y coule vraiment. En effet, en cas de nouveau raccordement, il arrive parfois que les règlements ne soient pas respectés et que des eaux pluviales se retrouvent rejetées dans un réseau d'eau usé. Le réseau d'eau usée se trouve ainsi « parasité » par des eaux pluviales.

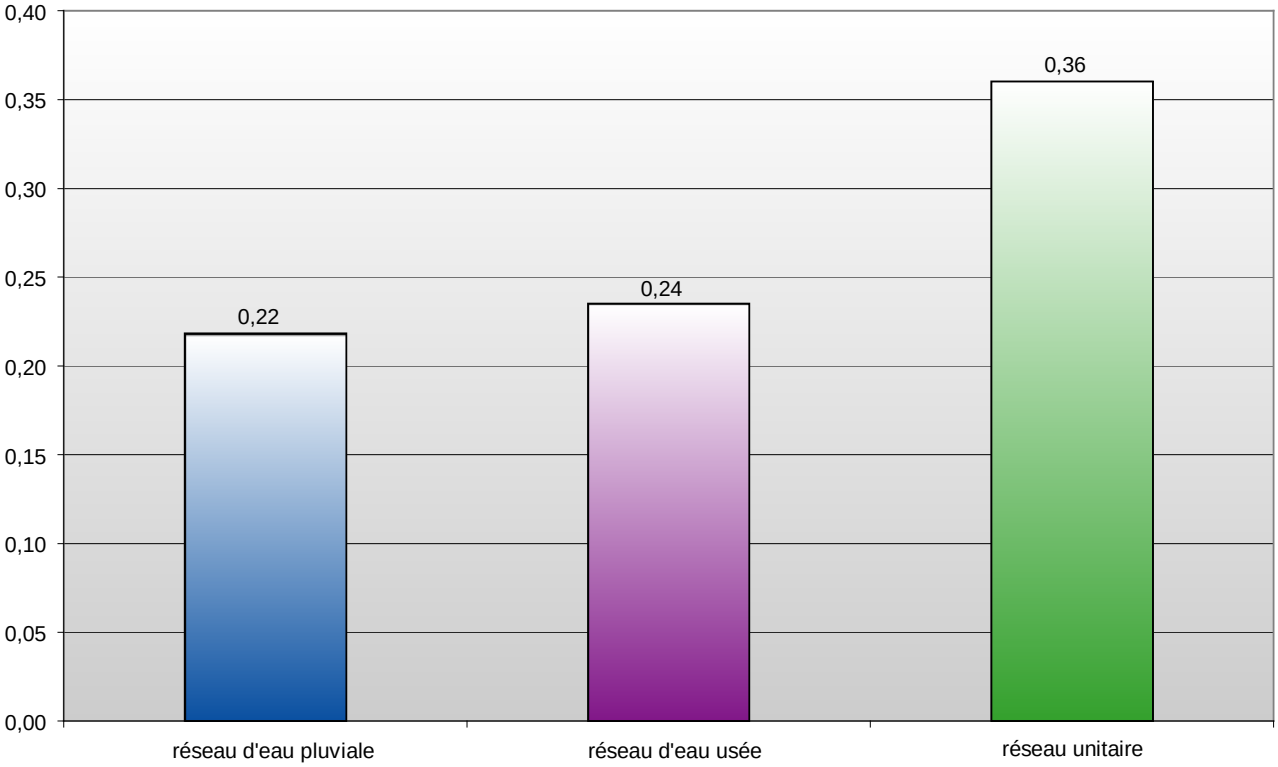


Figure 6.25 : Ratio de débordements par type et longueur de réseau d'assainissement

Cependant, ces débordements sont-ils uniformes dans l'espace ou certains secteurs seraient-ils plus touchés que d'autres ? Afin d'étudier cela, des cartes de densité ont été créées à l'aide de la même procédure qu'auparavant. Nous avons donc obtenu des cartes de densité de débordements par type de réseau (unitaire, pluvial ou usé), ou en cas d'absence de réseau (figures 6.26 a et b à 6.29 a et b). Une analyse de ces quatre cartes montre que toutes les parties des réseaux sont touchées.

Le réseau unitaire se situant dans le centre de l'agglomération urbaine et le réseau séparatif en périphérie (eau pluviale et eau usée), nous retrouvons donc les débordements de ces réseaux respectivement au milieu de l'agglomération et sur les pourtours. Comme indiqué précédemment, les densités de débordement sur le réseau unitaire sont bien supérieures à celles rencontrées sur le réseau d'eau pluviale et d'eau usée.

Les inondations recensées en cas d'absence de réseau atteignent 1,2 débordement par kilomètre carré dans certains secteurs. À la lecture des commentaires de certaines fiches de débordement, il semble que ces derniers soient dus à des travaux d'extension en cours (d'où une «absence de réseau »), et se concentrent logiquement principalement sur la plaine de l'est lyonnais, zone actuelle d'expansion des activités du Grand Lyon.

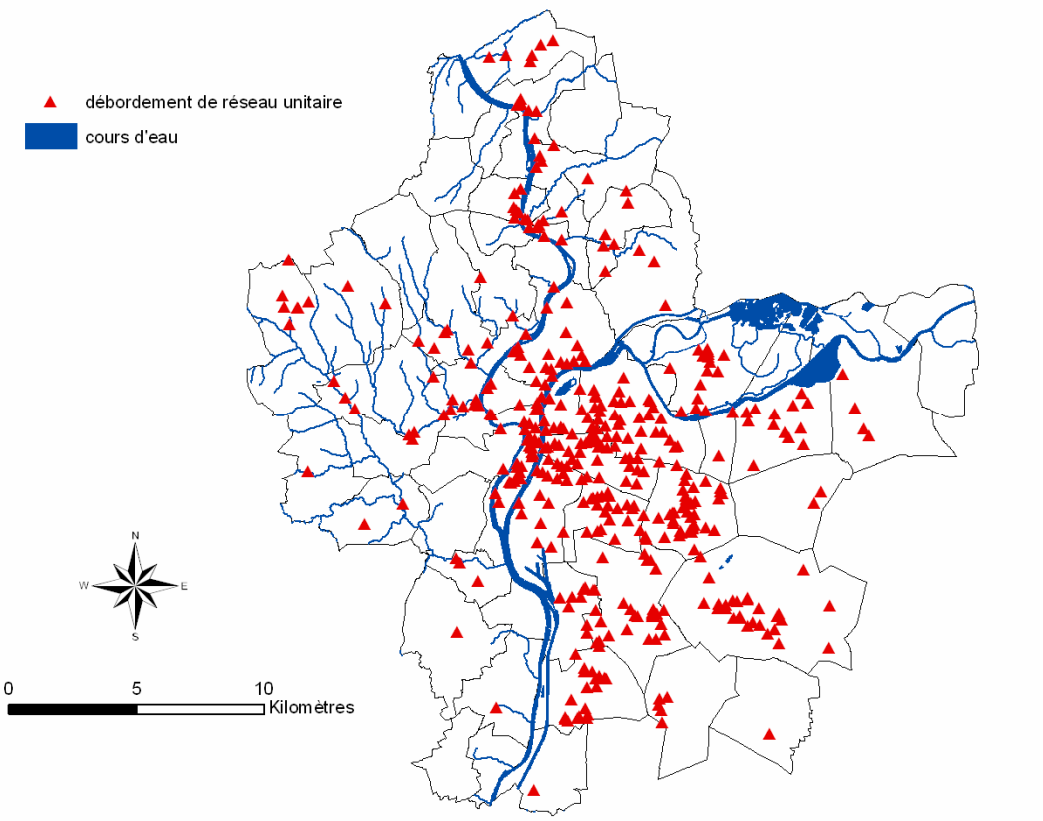


Figure 6.26 a : Débordements du réseau d'assainissement unitaire

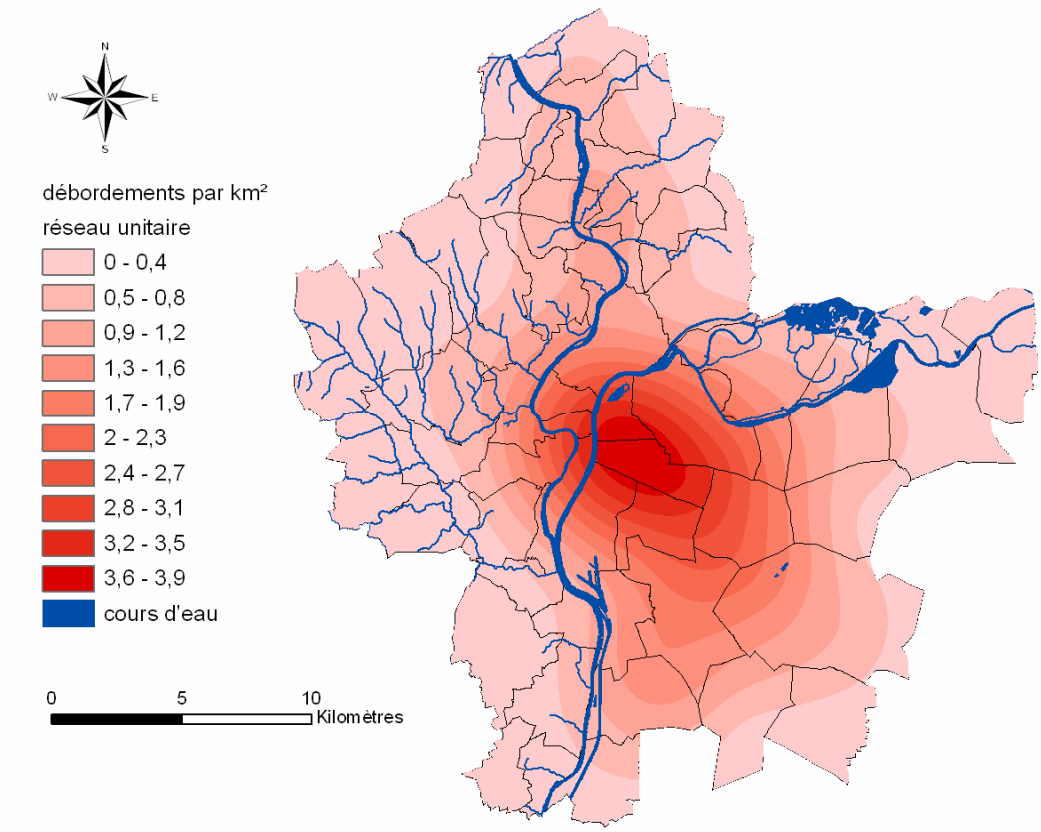


Figure 6.26 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement unitaire

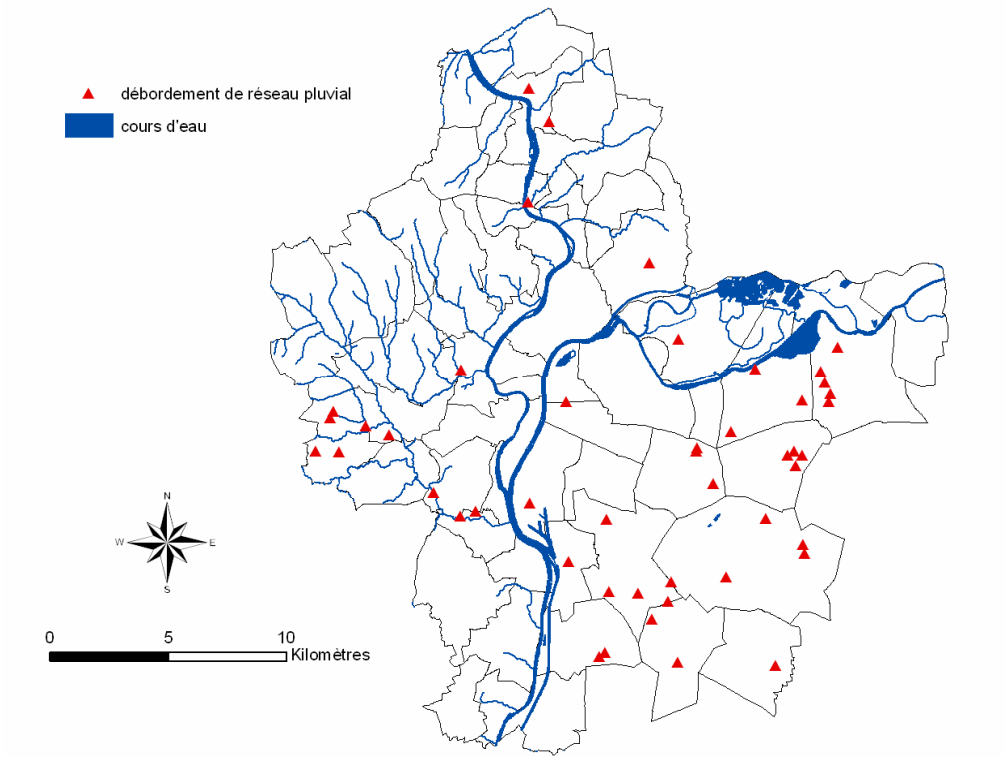


Figure 6.27 a : Débordements du réseau d'assainissement pluvial

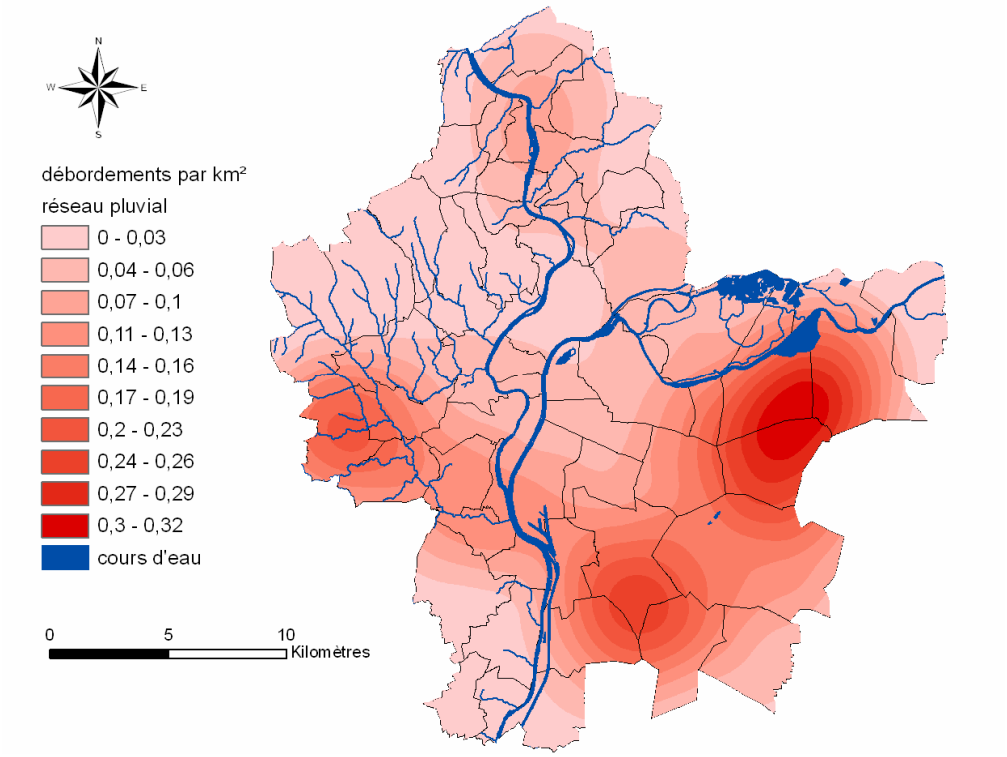


Figure 6.27 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement pluvial

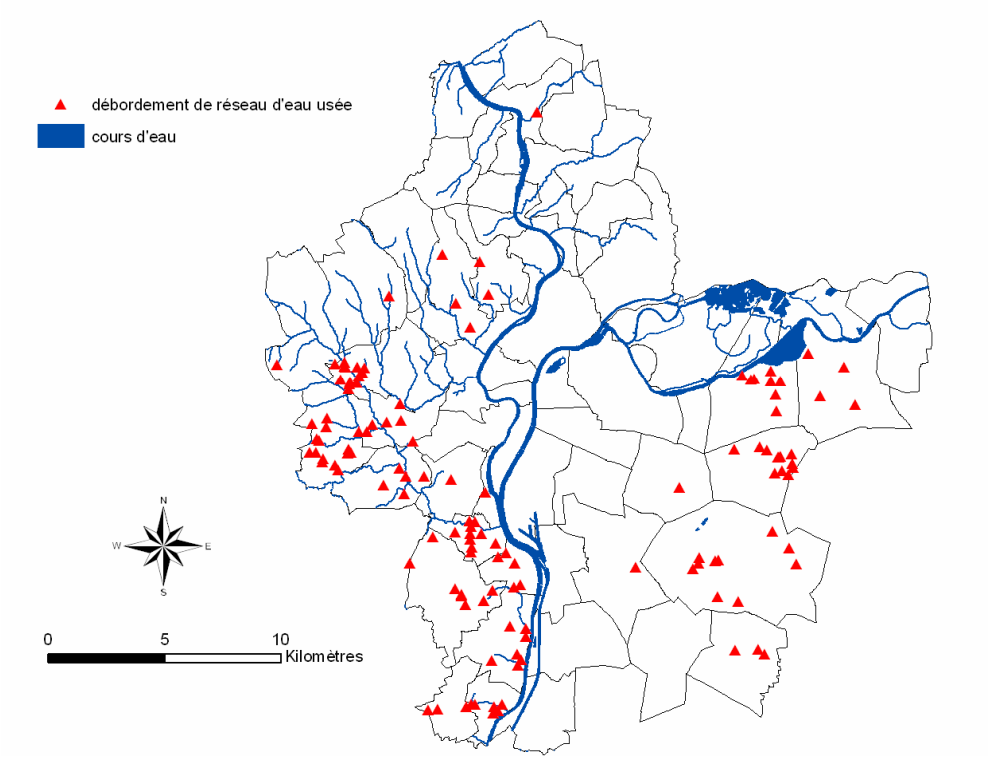


Figure 6.28 a: Débordements du réseau d'assainissement d'eau usée

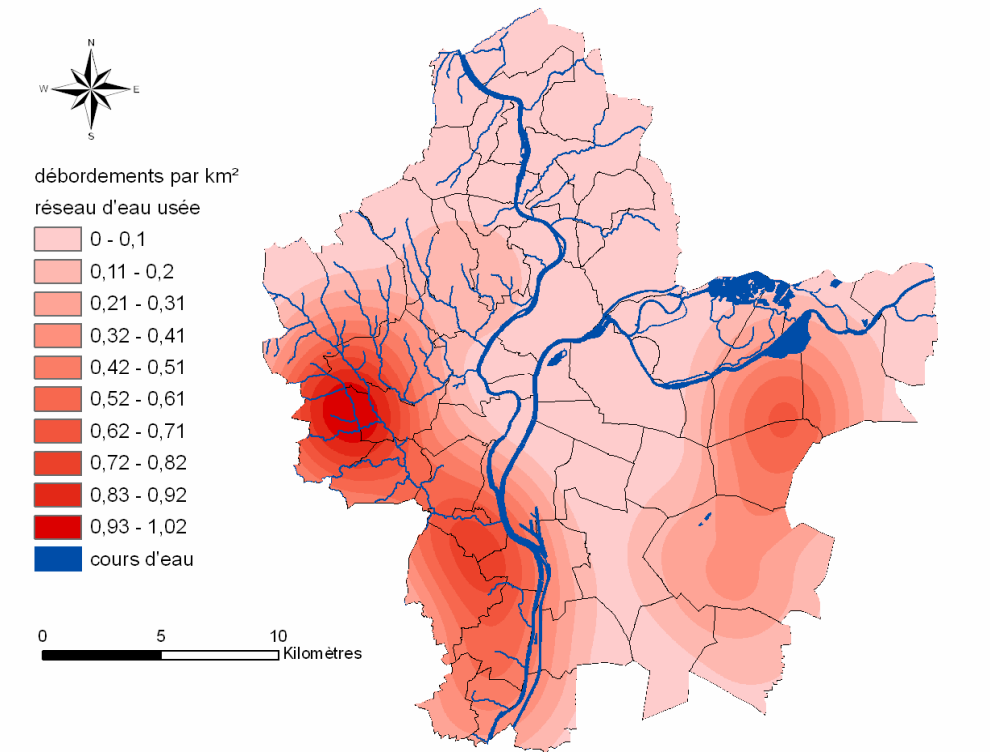


Figure 6.28 b: Densité de débordements du réseau d'assainissement d'eau usée

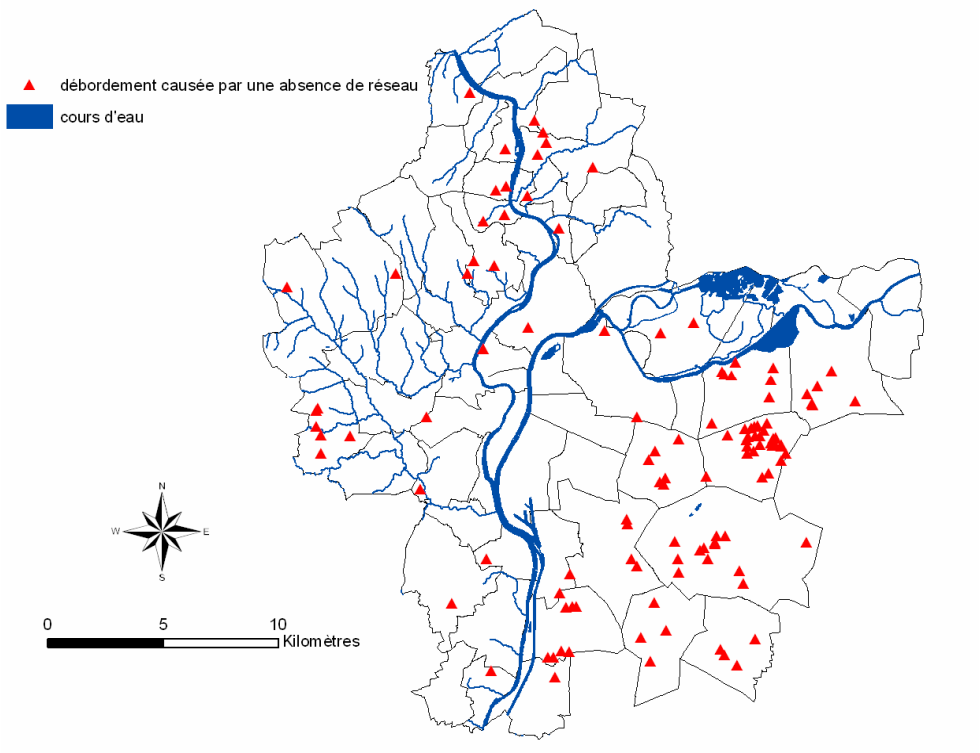


Figure 6.29 a : Débordements survenus lors d'une absence du réseau d'assainissement

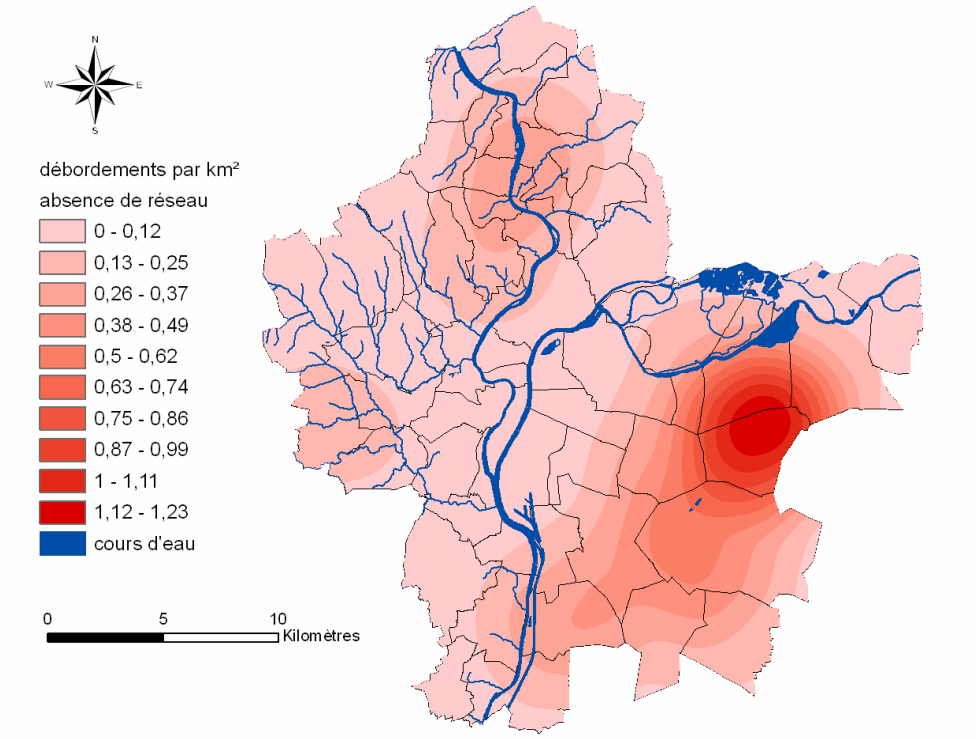


Figure 6.29 b : Densité de débordements survenus lors d'une absence du réseau d'assainissement

Toutefois, cette analyse par type de réseau a montré ses limites et se doit d'être encore affinée. En effet, un réseau d'assainissement est un assemblage de divers types d'éléments tels que les canalisations, les puits d'infiltration, les avaloirs, les tampons, ou les caniveaux. Grâce à la base de données « débordements », il est possible d'étudier quel type d'ouvrage constitutif du réseau est à l'origine de débordements.

2.4.2 Quantification et distribution spatiale des débordements en fonction des éléments constitutifs du réseau

Le réseau d'assainissement du Grand Lyon est nécessairement composé de différents éléments constitutifs (canalisation, puits d'infiltration, avaloirs, etc.). A l'aide de la base de données « débordements », il est possible d'établir quels types d'éléments sont en cause lors de débordements. Ainsi, la base de données nous apprend que 43% des débordements sont liés à des problèmes concernant les bouches d'égouts et les avaloirs, 27% sont dus à un problème de canalisation, alors que les puits d'infiltration en regroupent 19% (fig. 6.30).

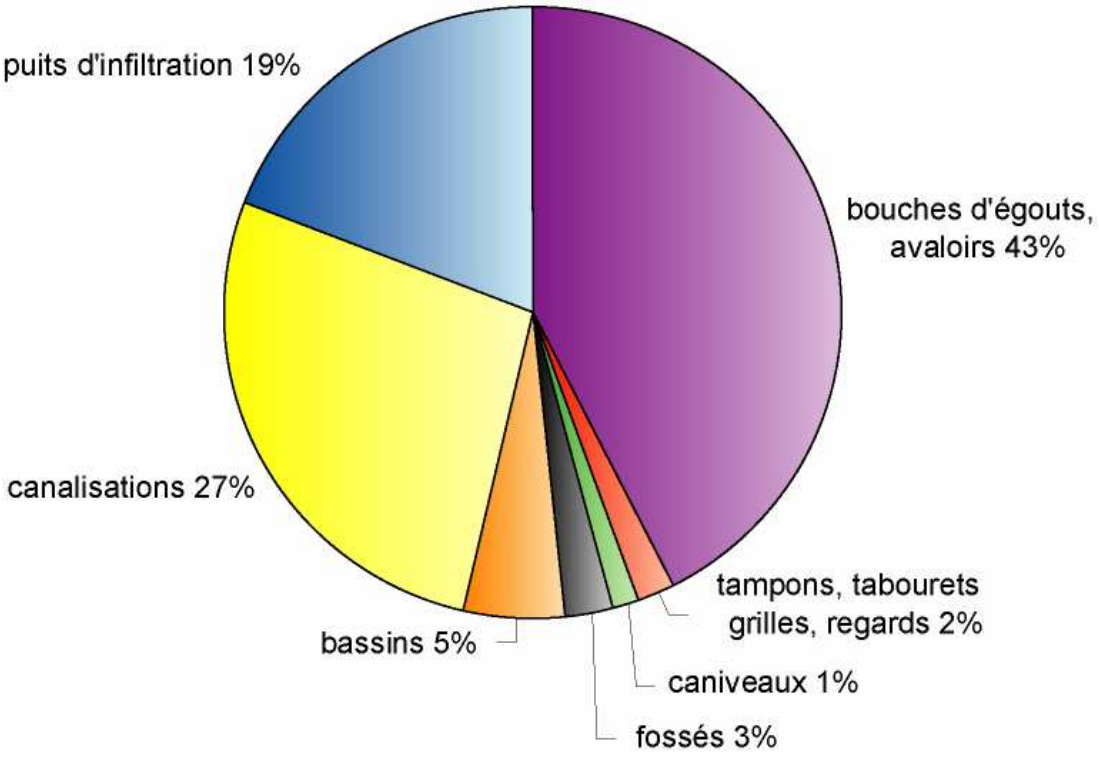


Figure 6.30 : Origine des débordements en fonction de la nature des éléments constitutifs du réseau d'assainissement

À l'aide de cartes de densité de débordements en fonction des éléments, nous constatons que les débordements liés aux bouches d'égouts et aux avaloirs se concentrent principalement dans le centre et l'est lyonnais, avec des densités atteignant le débordement par kilomètre carré (figure 6.31 a et b). Même constat en ce qui concerne les canalisations, avec une extension des débordements à l'ouest lyonnais et notamment à la vallée de l'Yzeron (figure 6.32 a et b). À l'opposé, les débordements liés aux puits d'infiltration se situent presque exclusivement dans la plaine de l'est lyonnais, avec des densités atteignant ici aussi le débordement par kilomètre carré (figure 6.33 a et b). Ce constat s'explique par le fait que la quasi-totalité de ces puits se trouvent en effet sur l'est lyonnais, l'absence d'exutoire hydrographique nécessitant de recourir à ce type de technique pour l'évacuation des eaux pluviales. De ce fait, il apparaît qu'à chaque zone territoriale lyonnaise correspond un type particulier de débordements du réseau d'assainissement, et que les ouvrages constitutifs touchés varient en fonction de leur localisation géographique. Néanmoins, il est alors légitime de se demander si les différents types de pluies influencent les débordements et les comportements de ces éléments constitutifs.

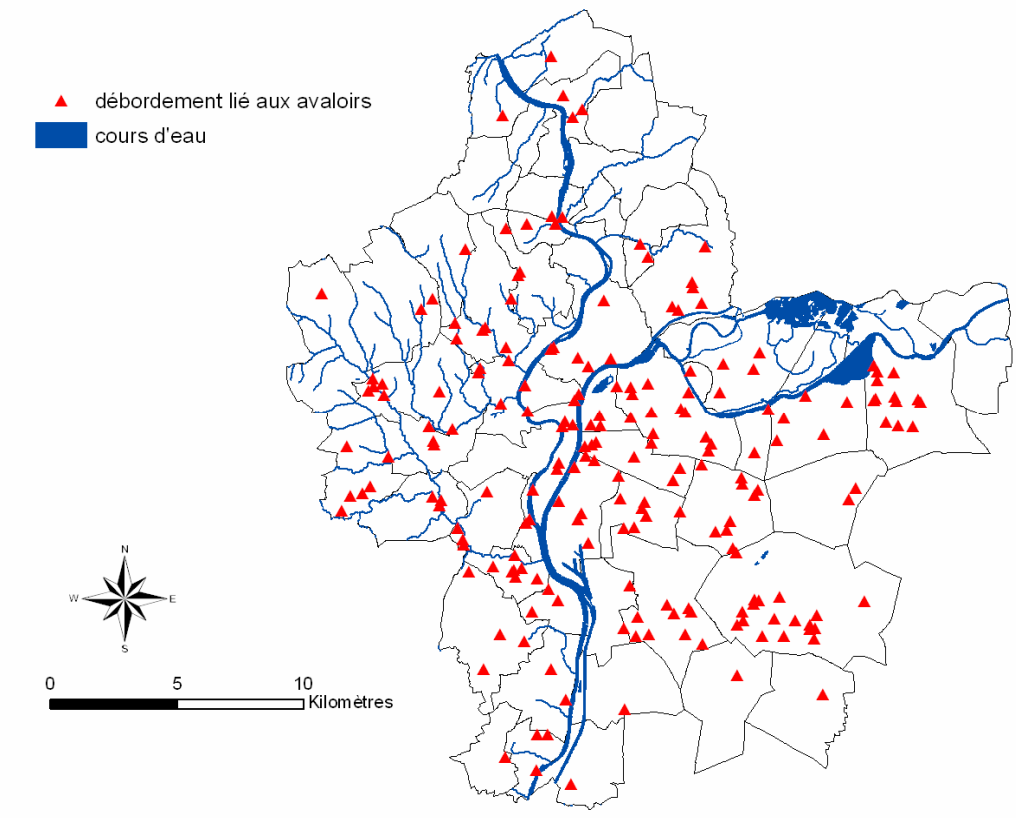


Figure 6.31 a: Débordements du réseau d'assainissement liés aux bouches d'égouts et aux avaloirs

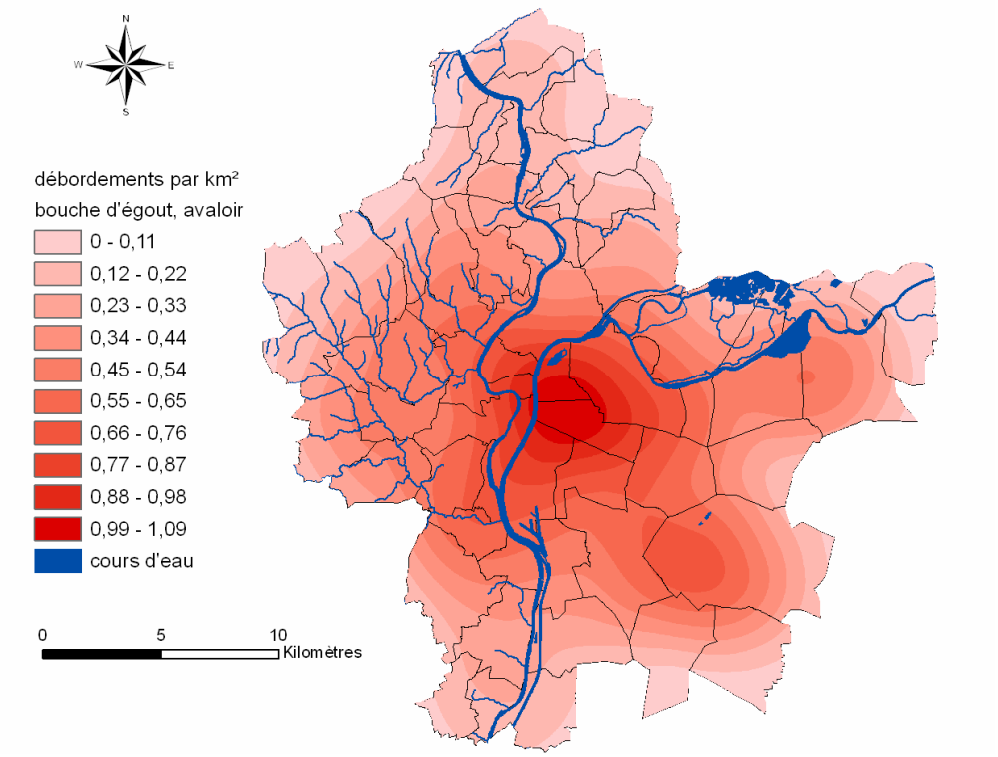


Figure 6.31 b: Densité de débordements du réseau d'assainissement liés aux bouches d'égouts et aux avaloirs

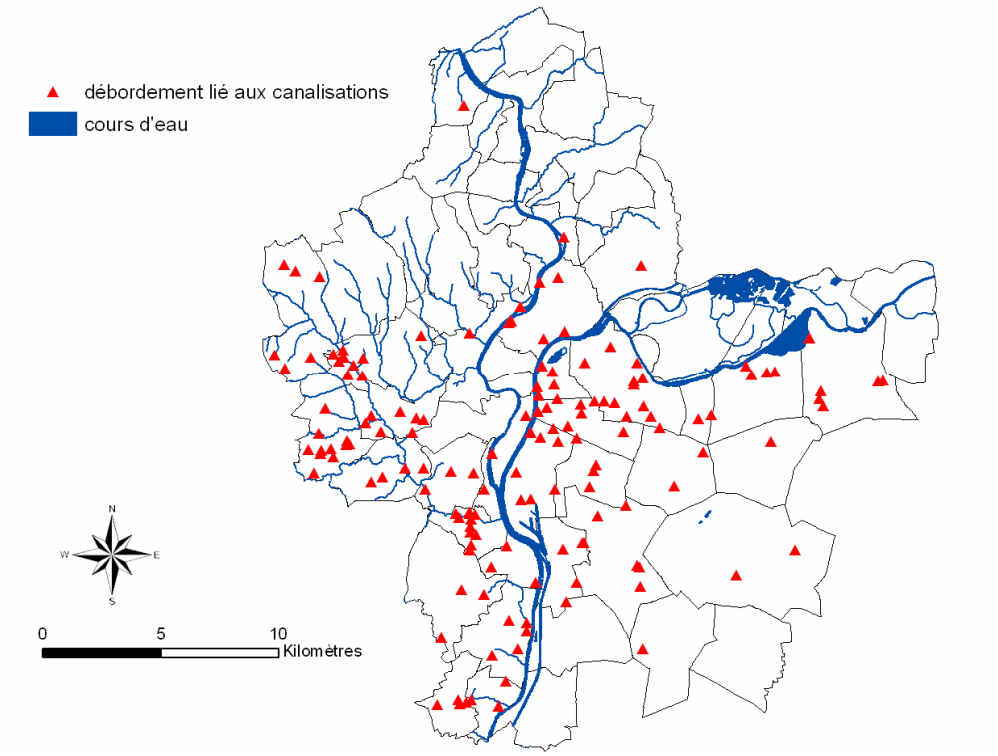


Figure 6.32 a : Débordements du réseau d'assainissement liés aux canalisations

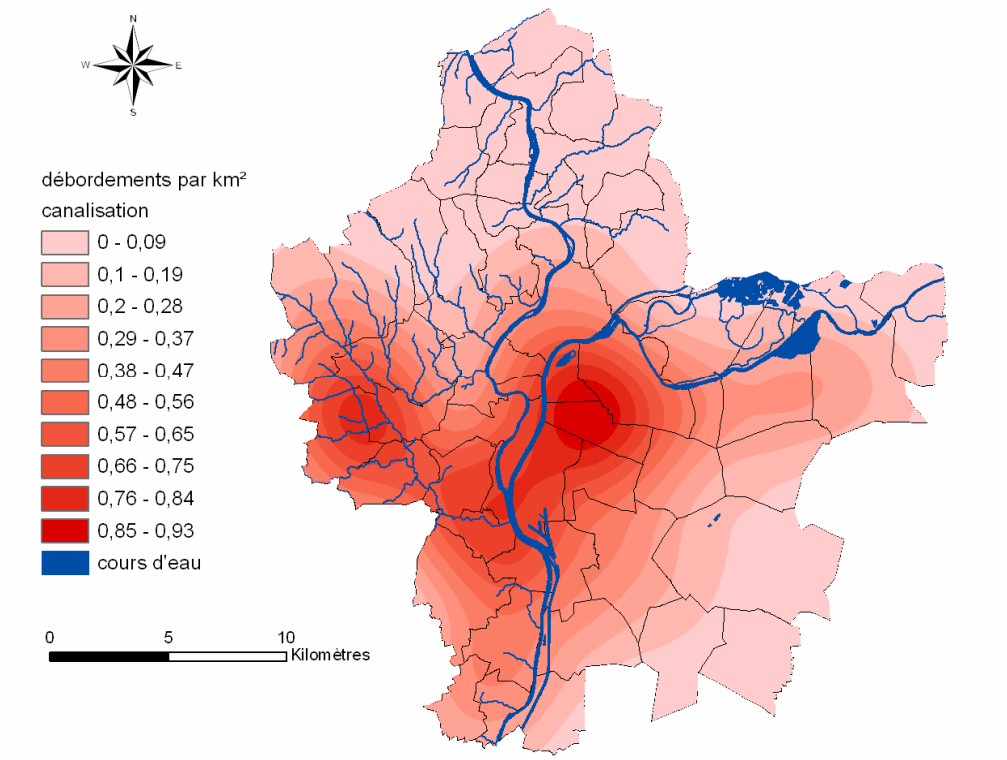


Figure 6.32 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement liés aux canalisations

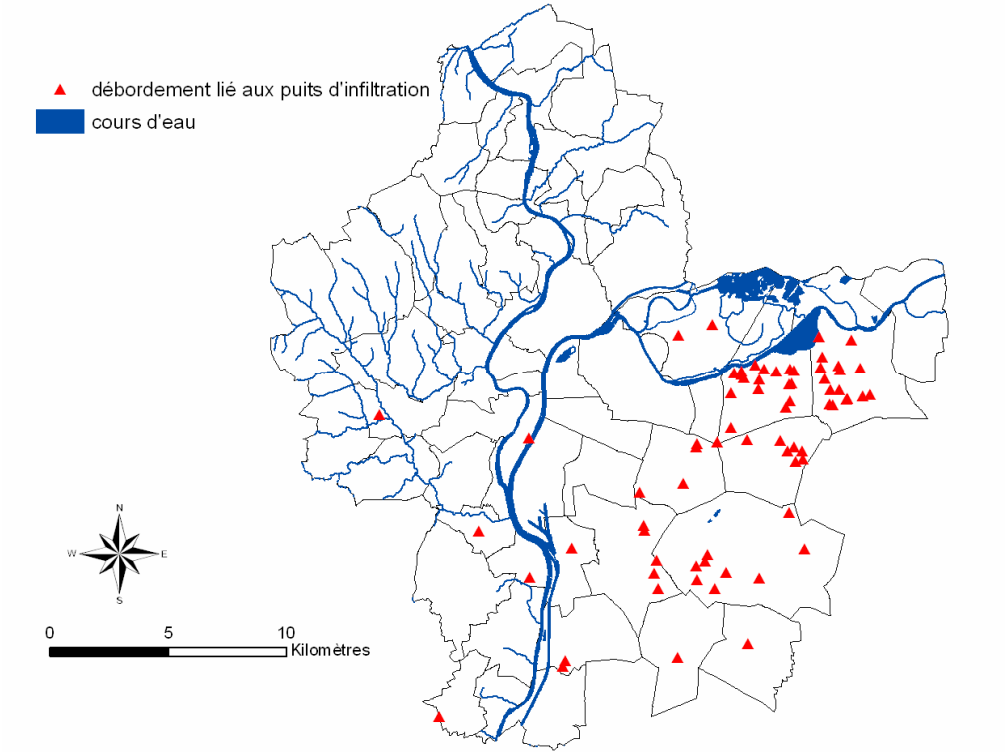


Figure 6.33 a : Débordements du réseau d'assainissement liés aux puits d'infiltration

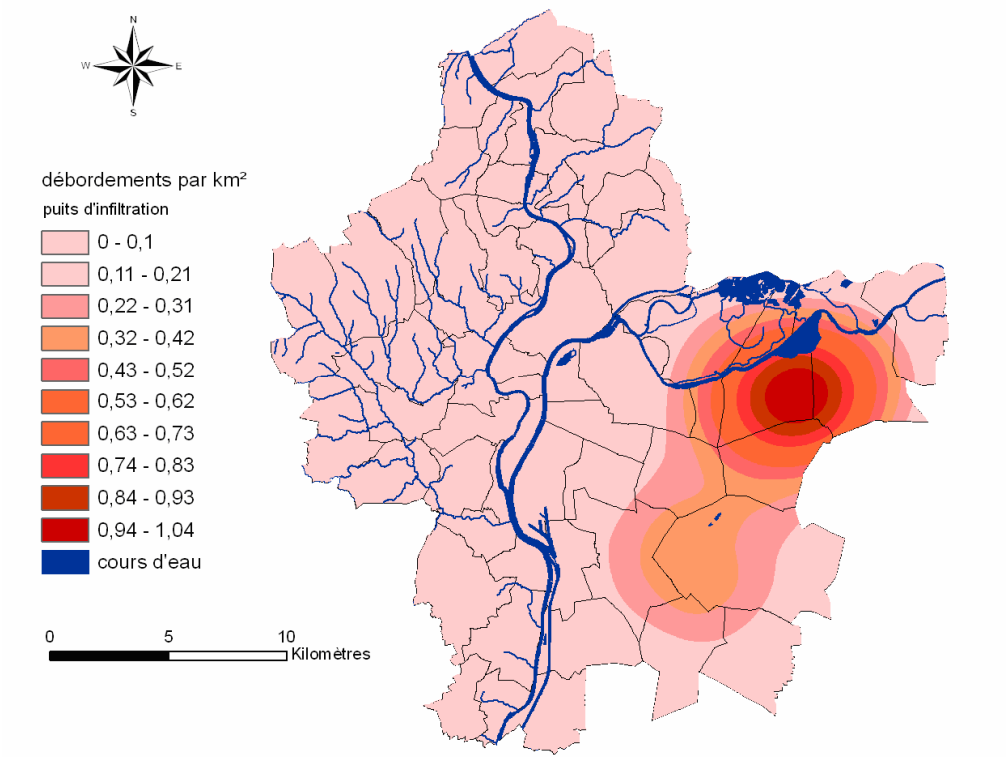


Figure 6.33 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement liés aux puits d'infiltration

2.5 Analyse spatiale croisée des débordements en fonction du type d'ouvrage et de la pluie

Afin de clore la première partie de ce chapitre, une analyse spatiale croisée des débordements des éléments constitutifs du réseau d'assainissement en fonction des types de pluies va être réalisée. Pour cela, des cartes croisant les types de pluies à l'origine des débordements avec les types d'éléments principalement mis en cause sont réalisées. Les pluies peuvent être de quatre types : remarquables en termes d'intensité moyenne en 18 minutes, en termes de hauteur totale moyenne précipitée, en termes de durée, et ordinaires. Les éléments principalement incriminés sont au nombre de trois (bouche d'égout et avaloir, canalisation et puits d'infiltration). Douze cartes ont donc été créées.

Sur chacune des cartes figure les débordements provoqués par un des types de pluies et ceux liés à un des types de dispositifs. L'étape finale a donc consisté à sélectionner les

débordements des différents dispositifs provoqués par les types de pluies (fig. 6.34), puis à calculer la part relative du type d'élément impliqué dans le débordement en fonction du type de pluie. Des cartes de densité ont aussi été réalisées avec les mêmes sélections, afin de permettre une visualisation plus aisée des zones touchées (tableau 6.5).

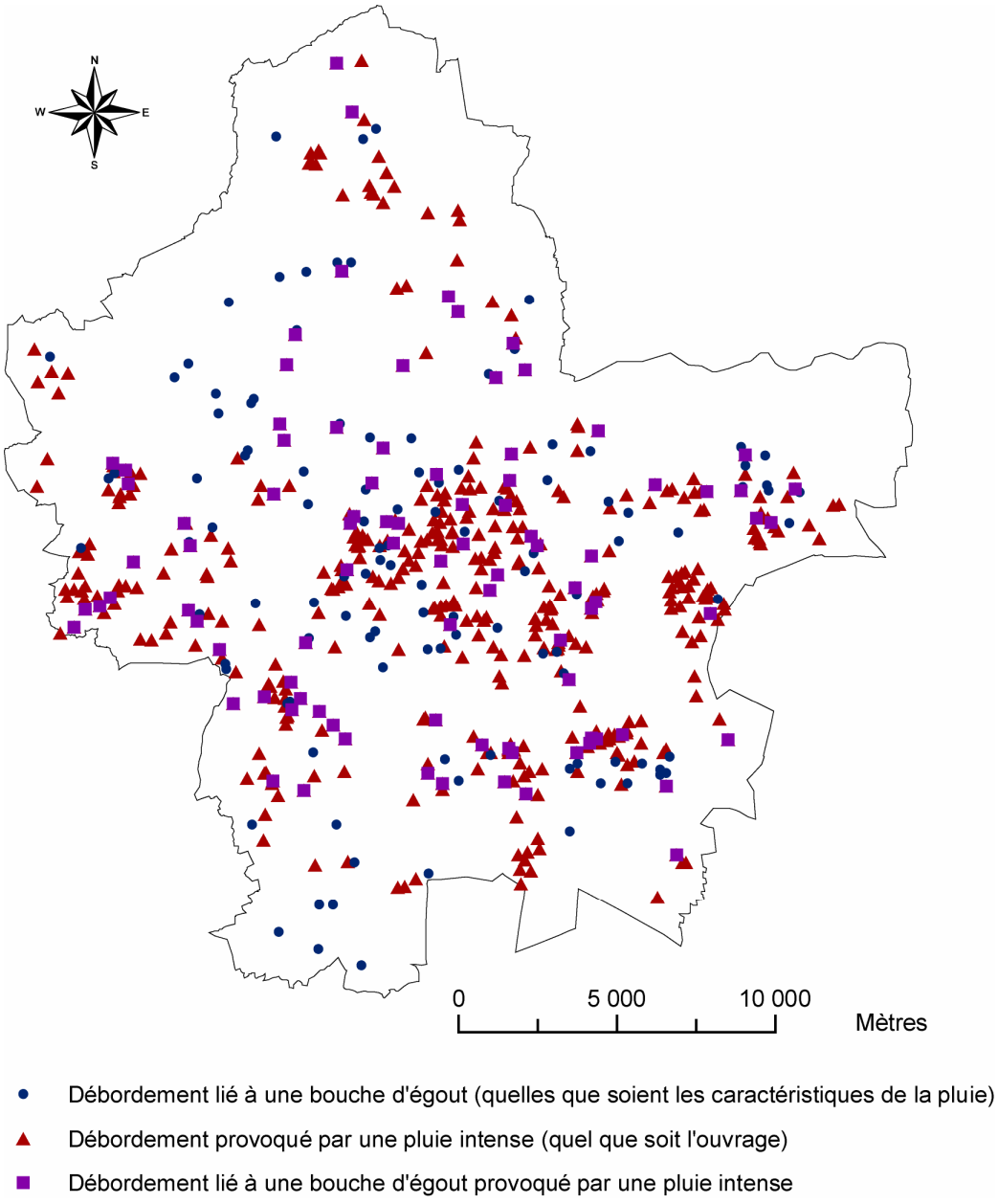


Figure 6.34 : Débordements provoqués par des pluies remarquables en termes d'intensité moyenne en 18 minutes et débordements liés aux avaloirs / bouches d'égouts. Les triangles correspondent aux débordements liés à la pluie intense, et les disques correspondent à ceux liés aux avaloirs. Les points sélectionnés en bleu répondent aux débordements d'avaloirs provoqués par des pluies remarquablement intenses (34,5% des débordements totaux d'avaloirs)

Tableau 6.5 : Débordements de types d'éléments du réseau en fonction du type de pluies considérées (%). Par exemple, 34,5 % des débordements liés à des avaloirs / bouches d'égouts l'ont été durant des pluies intenses (la légende qualitative de rouge clair à rouge mène d'une faible à une forte densité de débordements)

Il ressort de ces cartes plusieurs conclusions intéressantes pour le gestionnaire du réseau d'assainissement. En premier lieu et concernant les avaloirs / bouches d'égouts, ces derniers sont affectés globalement par tous les types de pluies (remarquables et ordinaires), mais avec une sensibilité accrue de ce type d'ouvrage dans le centre urbain lors de pluies intenses. En effet, 34,5% des débordements d'avaloirs sont provoqués par des pluies intenses (tableau 6.5).

Les canalisations de l'ouest lyonnais sont affectées par tous les types de pluies, avec dans ce cas aussi une plus forte sensibilité dans le centre urbain lors de pluies intenses (38,3% des débordements liés à des canalisations sont provoqués par des pluies intenses).

Les puits d'infiltration, quant à eux, sont particulièrement affectés lors d'épisodes intenses (33,7%) ou ordinaires (38,2%). Pour relativiser, ces puits semblent peu sensibles à des épisodes pluvieux remarquables en termes de hauteur totale d'eau précipitée (16,9%) ou en termes de durée, car seulement 11,9% des débordements de puits sont provoqués lors de ces pluies. Les puits d'infiltration seraient donc particulièrement sensibles en cas de pluies très intenses ou de pluies ordinaires lorsque ceux-ci sont déjà saturés, mais seraient relativement efficaces en cas de pluies longues ou abondantes.

La base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie » de la Direction de l'eau est donc un outil opérationnel performant qui a permis de mettre à jour de nombreux résultats concernant les nuisances liées à l'eau. La validité de cette dernière a été mise à l'épreuve en la confrontant à des sources complémentaires d'origines et de natures diverses. La base a notamment révélé que les pluies intenses étaient responsable de plus de la majorité des débordements, et qu'ils se situaient de préférence dans le centre urbain sur le réseau unitaire. Afin de compléter cette étude descriptive, les débordements vont maintenant être modélisés pour les comparer d'une manière spatiale et qualitative à ceux qui ont été observés et rapportés dans la base de données.

3 Comparaison spatiale entre débordements observés et modélisés

L'objectif ici est de confronter les indications spatiales et temporelles des débordements contenus dans la base de données de la Direction de l'eau aux sorties du modèle de simulation du réseau d'assainissement. Nous avons vu que la base de données fournissait des occurrences de dates et de lieux de débordements. Ainsi, nous avons pu mettre en relation les divers types de débordements avec les différentes natures des épisodes pluvieux déjà sélectionnés. Cette partie va pousser encore plus loin la démarche en ayant comme objectif de comparer les débordements observés aux débordements modélisés.

3.1 La nécessité de recourir à la modélisation du réseau d'assainissement du Grand Lyon

3.1.1 Contexte de la modélisation du réseau

La Direction de l'Eau de la Communauté Urbaine de Lyon, et plus particulièrement l'unité études générales et modélisation du service études, s'est engagée depuis une vingtaine d'années dans le développement d'outils de simulation du fonctionnement des réseaux d'assainissement. Ce développement a été réalisé en collaboration avec la recherche scientifique universitaire dans le domaine, notamment le LGCIE de l'INSA de Lyon. Cela a contribué au développement de logiciels informatiques permettant de mieux comprendre le fonctionnement du réseau de l'agglomération lyonnaise afin d'en améliorer les performances globales. En outre, le guide technique « La Ville et son Assainissement »,

publié par le centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques en 2003, a confirmé le bien-fondé de cette démarche (CERTU, 2003).

Ainsi, la Direction de l'eau s'est engagée en 1999 dans la mise en œuvre de l'autosurveillance du système d'assainissement (Hodeau et Varnier, 2001). Pour répondre à cet objectif, une démarche en plusieurs étapes a été mise en place. La première a été de prendre connaissance le plus précisément possible du patrimoine du réseau et de ses déversoirs d'orage. Le déversoir d'orage est un « ouvrage permettant le rejet direct d'une partie des effluents au milieu naturel lorsque le débit à l'amont dépasse une certaine valeur. Les déversoirs d'orage sont généralement installés sur les réseaux unitaires dans le but de limiter les apports au réseau aval, et en particulier dans la station d'épuration en cas de pluie » (Chocat, 1997a).

La seconde a été de construire un modèle général de simulation du fonctionnement du réseau. Enfin, la dernière étape a été d'installer des stations de mesure sur le réseau pour permettre de mesurer les rejets des principaux déversoirs d'orage et les débits transitant en certains points particuliers du réseau. Cette opération est réalisée par une des unités de la Direction de l'eau, l'unité « métrologie ».

3.1.2 Le logiciel de modélisation du réseau : Canoe

Le logiciel utilisé pour la modélisation des réseaux d'assainissement de la Communauté Urbaine de Lyon est *Canoe*. Il est développé par le LGCIE de l'INSA de Lyon, Insavalor, les sociétés SOGREAH et *Alison*, et avec l'aide d'un groupe de partenaires constitué de grandes collectivités françaises (le Grand Lyon, le département de la Seine Saint Denis, le département du Val de Marne et la ville de Rennes). Ce partenariat assure un développement continu et adapté aux besoins des utilisateurs. Dans cette étude, nous avons précisément utilisé la version 3.3 du logiciel.

3.1.3 Modélisation du réseau d'assainissement : principe

Tout comme le réseau de mesure de la pluie au sol ou le radar météorologique, le modèle est un outil. Il est constitué d'un jeu de données (catalogue de pluies, descriptifs de bassins versants et de réseaux) et d'un logiciel. En hydrologie urbaine, la notion de modèle est employée pour désigner une représentation physique du cycle de l'eau, construite dans l'objectif de mieux comprendre son fonctionnement afin de pouvoir le faire évoluer. Il s'utilise

comme un simulateur qui permet de comprendre le fonctionnement actuel, mais aussi de placer le réseau dans des conditions peu ou pas expérimentées sur le terrain, par exemple pendant des situations pluvieuses qui ne se sont jamais rencontrées jusqu'à présent.

Dans la modélisation du système du Grand Lyon, nous considérons que la consommation d'eau potable des habitants se retrouve en totalité dans le réseau d'assainissement. Le cheminement des eaux usées est ainsi relativement simple. Au contraire, le cheminement des eaux pluviales est beaucoup plus complexe. En effet, l'eau de pluie qui tombe sur un bassin versant est soit stockée, évaporée ou infiltrée (et ainsi ne se retrouvera pas dans le système), soit elle ruisselle jusqu'au moment où elle est captée par le réseau par une bouche d'égout ou un avaloir.

De cette manière, le cycle de l'eau peut être schématisé par deux étapes majeures successives (fig. 6.35). La première est l'étape de production d'eau. Il s'agit de la production d'eaux usées et de la transformation de la donnée de pluie en une donnée de débit d'eaux pluviales aux exutoires des bassins versants. La seconde étape est la propagation de l'eau en réseau qui permet de simuler le cheminement de ces débits dans le réseau d'assainissement, depuis les exutoires des bassins versants aux exutoires du réseau (les déversoirs ou les stations d'épuration).

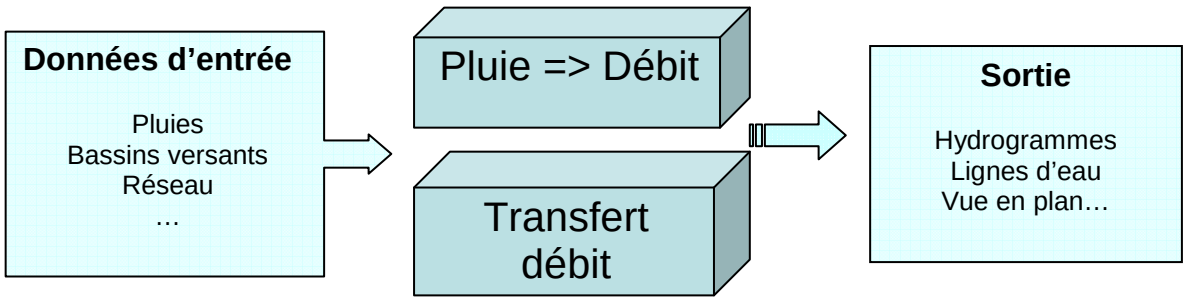


Figure 6.35 : schéma de fonctionnement simplifié de la démarche de modélisation du réseau d'assainissement (source : Direction de l'eau, 2009)

3.1.4 Construction du modèle général du réseau d'assainissement

Le « modèle général » est constitué de 8 modèles indépendants qui correspondent aux bassins versants des stations d'épuration (fig. 6.36).

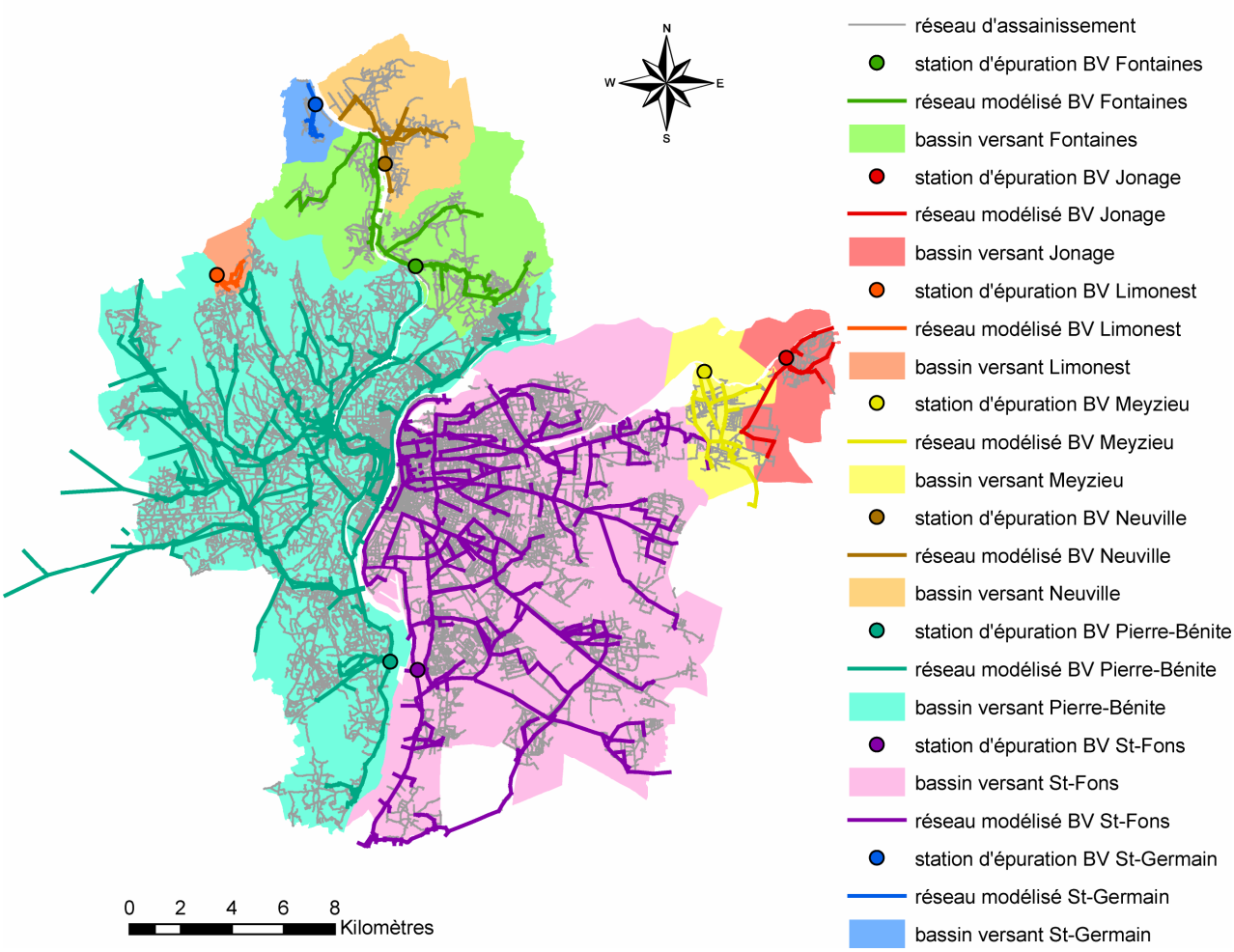


Figure 6.36 : Bassin versant du Grand Lyon, réseau d'assainissement, stations d'épuration et réseau structurant modélisé avec Canoe

Les modèles de base du réseau d'assainissement ont été réalisés à partir d'une extraction des données du SIG de la Communauté Urbaine de Lyon vers le logiciel de simulation *Canoe*. Ensuite, des bassins versants ont été associés afin de représenter les apports d'eau usée et d'eau pluviale au système, ainsi que les déversoirs d'orage principaux et les ouvrages spéciaux (en particulier des pompes des stations de relèvement et des stations d'épuration). Au final, 677 km de réseau (soit 25 % du réseau environ) et 250 déversoirs d'orage figurent dans le modèle.

3.1.5 Calage des modèles et limites des simulations

Afin d'utiliser un modèle d'une manière opérationnelle, il est nécessaire de le caler, un peu à la manière des données radars, à partir de mesures réelles en réseau et des données pluviométriques correspondantes. Le calage à partir des mesures réelles en réseau a été réalisé dans un premier temps à partir de mesures déjà existantes, puis à la suite de

campagnes de mesures complémentaires. Le premier calage a permis d'identifier des dysfonctionnements, aussi bien au niveau du modèle que de la métrologie en réseau. La mise à jour de ces dysfonctionnements est à l'origine de la création d'un groupe de travail spécifique. En effet, en conséquence, les services des unités « métrologie » et « études générales et modélisation » se rencontrent ainsi une fois tous les deux mois environ pour confronter les résultats de la métrologie avec ceux des modèles.

En outre, il est nécessaire d'apprécier les résultats du modèle général en tenant compte des principales sources d'incertitudes de la démarche sur les données pluviométriques en entrées (obtenues à partir du réseau de mesure au sol ou du radar météorologique), des mesures réalisées dans le réseau, et de notre connaissance du système d'assainissement et des bassins versants.

3.1.6 Principe de la confrontation des débordements modélisés aux débordements observés

Le but de la démarche est de comparer les débordements observés qui sont recensés dans la base de données aux débordements modélisés par simulation avec le logiciel *Canoe*. Pour cela, il est nécessaire d'avoir une liste de pluies à simuler. Ces précipitations sont donc les événements pluvieux remarquables en termes d'intensité, de hauteur d'eau et de durée, ainsi que les événements ordinaires, qui sont à l'origine de débordements figurant dans la base de données. Ces différentes pluies ont servi comme intrants à des simulations de type Barré de Saint Venant menées avec *Canoe*, ainsi que nous allons l'expliquer.

Ces simulations permettent d'obtenir deux types de résultats, qui seront par la suite comparés aux observations. Le premier genre de résultats fournis par *Canoe* est la hauteur d'eau dans la canalisation, ce qui permet de localiser les conduites en charge. Le deuxième type de résultat est la localisation précise de ces débordements simulés à chacun des nœuds modélisés du système d'assainissement, qui se traduit bien souvent sur le terrain par une résurgence d'eau par un tampon de regard (fig. 6.37). Un tampon est « la partie amovible du regard de visite d'égout, généralement circulaire, posée sur un cadre scellé au regard. Le cadre et son tampon forme un ensemble homogène » (Chocat, 1997a).

Figure 6.37 : Exemple de mise en charge du réseau qui se traduit par un débordement au niveau du tampon (source : Caradot et al., 2010a)

Une carte a donc été produite pour chaque simulation de chaque épisode pluvieux étudié sur chaque bassin versant de l'agglomération. Cette carte indique donc de manière précise les collecteurs en charge, ainsi que les points de débordements potentiels (fig. 6.38). Ces résultats vont être confrontés d'une manière spatiale et qualitative aux débordements de la base de données issus des observations du terrain. Il est néanmoins nécessaire d'être conscient des limites de l'étude, qui portent aussi bien sur le modèle de simulation que sur la base de données « débordements ».

En effet, le modèle ne peut fournir d'indications concernant les puits d'infiltration, qui ne sont pas modélisés, ou les problèmes liés à des avaloirs obstrués par des feuilles d'arbres par exemple. De plus, il n'y a que 25 % du réseau qui est modélisé. Les débordements observés sur une partie non modélisée ne trouveront forcément pas leurs équivalents simulés. En outre, il a été expliqué que la base de données «débordements » ne pouvait être exhaustive. Il s'agit d'une base de données renseignée sur le terrain par les équipes opérationnelles intervenant en réseau. De cette manière, les fiches ne sont pas toujours complétées d'une manière intégrale ou même lisiblement. En effet, parfois ne sont mentionnés que le lieu et la date du débordement, sans plus d'indications. De plus, certaines équipes ne prennent pas toujours le temps de remplir une fiche après un débordement.

Malgré toutes ces limites, tous les débordements observés lors d'un épisode vont être confrontés d'une manière qualitative et spatiale aux sorties du modèle. Une première étude n'avait porté que sur les débordements observés où il était expressément mentionné dans les fiches qu'il s'agissait de problèmes liés aux canalisations et à leurs mises en charge. Cependant, le nombre de débordements et d'épisodes sélectionnés s'est révélé trop faible

pour obtenir des conclusions valables. C'est pourquoi nous avons décidé d'inclure dans l'échantillon de comparaison l'ensemble des débordements qui possédaient à la fois une indication de date et de lieu.

Il s'agit en outre d'une comparaison spatiale qualitative. En effet, *Canoe* fournit des indications de volumes aux points de débordements. Mais ces informations sont ici d'une utilité relative étant donné que nous ne possédons pas, dans la base de données, ces renseignements sur les volumes débordés observés. Ce seront donc uniquement les zones touchées par des débordements observés et modélisés qui seront confrontées spatialement à l'aide de cartes de densité, afin de voir si les résultats coïncident.

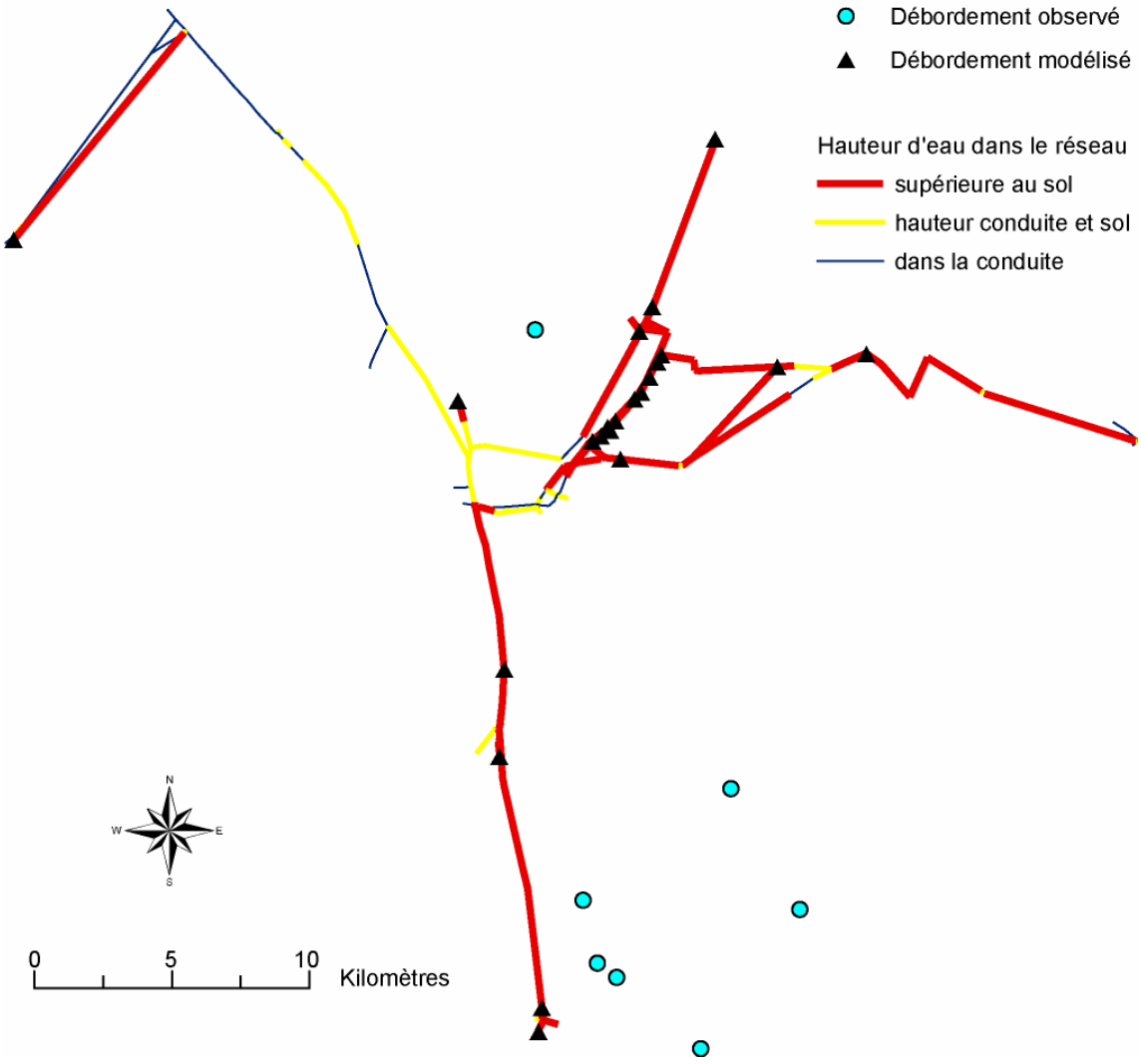


Figure 6.38 : Débordements observés et simulés, et hauteur d'eau dans le réseau pour la pluie du 10 juin 2000 sur le bassin versant modélisé de Neuville

3.2 Les résultats de la comparaison spatiale sont convaincants

Pour chacun des épisodes pluvieux simulés, les résultats issus de la modélisation (collecteurs en charge et points de débordement) sont comparés spatialement aux constats du terrain. Toutes les pluies sélectionnées ont été simulées par le logiciel avec succès et ont ainsi pu fournir des points de débordement aux noeuds du réseau structurant. Ces simulations ont été menées par le logiciel en résolvant les équations de Barré de Saint Venant (et non celles de Muksingum) qui « décrivent les écoulements non permanents à surface libre, unidimensionnels » (Chocat, 1997).

Pour chacun des événements pluvieux de l'échantillon, deux cartes de débordements sont établies et confrontées. Une représente les débordements simulés, alors que la deuxième figure ceux ponctuellement observés à partir de la base de données. Ensuite, les zones de densité de débordements sont créées afin d'obtenir une vision globale surfacique de la situation sur l'ensemble du territoire du Grand Lyon, et non plus un semi de points d'une lisibilité ardue. Nous obtenons des résultats pouvant être classés en quatre cas de figure. En effet, dans la plupart des cas (65% environ), la correspondance spatiale entre modélisation et observation est très forte. Dans le second cas (20% des cas environ), des débordements simulés se situent sur des zones où les observations sont absentes. Nous obtenons aussi des décalages dans l'espace sur le bassin versant de Saint-Fons entre les résultats des simulations et les nuisances répertoriées dans la base de données (10% environ), et enfin, dans très peu de cas, des débordements observés qui ne trouvent pas leurs équivalents simulés.

3.2.1 Une forte correspondance spatiale entre modélisation et observation

Dans la majorité des cas, nous constatons une très forte correspondance spatiale entre les débordements constatés sur le terrain et les débordements simulés (situés sur des collecteurs en charge), comme pour les épisodes du 04 août 2004 et du 07 septembre 1995 (fig. 6.39 et 6.40). Ces résultats sont très encourageants car ils confortent la véracité de la base de données, mais aussi la fiabilité du logiciel de simulation. En effet, dans bien des cas,

les zones touchées par les débordements identifiés par le constat des équipes de terrain coïncident fortement avec les résultats de la modélisation.

À chaque fois cependant, les densités de débordement obtenues par le biais de la modélisation sont supérieures à celles obtenues par l'observation, bien que les zones touchées coïncident d'une manière significative. C'est par exemple le cas de l'épisode du 04 août 2004, où les densités de débordements observées sont deux fois inférieures environ à celles qui ont été simulées.

Les raisons de cette inadéquation ont déjà été expliquées auparavant et tiennent à l'impossibilité de l'exhaustivité de la base de données (les équipes de terrain ne peuvent pas être partout en même temps). Néanmoins, cela ne constitue pas vraiment un frein à l'analyse. En effet, le but de cette étude est de comparer qualitativement dans l'espace les zones touchées, d'une manière spatiale, et non de comparer quantitativement les débordements obtenus à partir des deux outils, ainsi que les volumes déversés. Toutefois, ce deuxième niveau d'étude, moins spatial et plus hydrologique, pourra faire l'objet de recherches *a posteriori*.

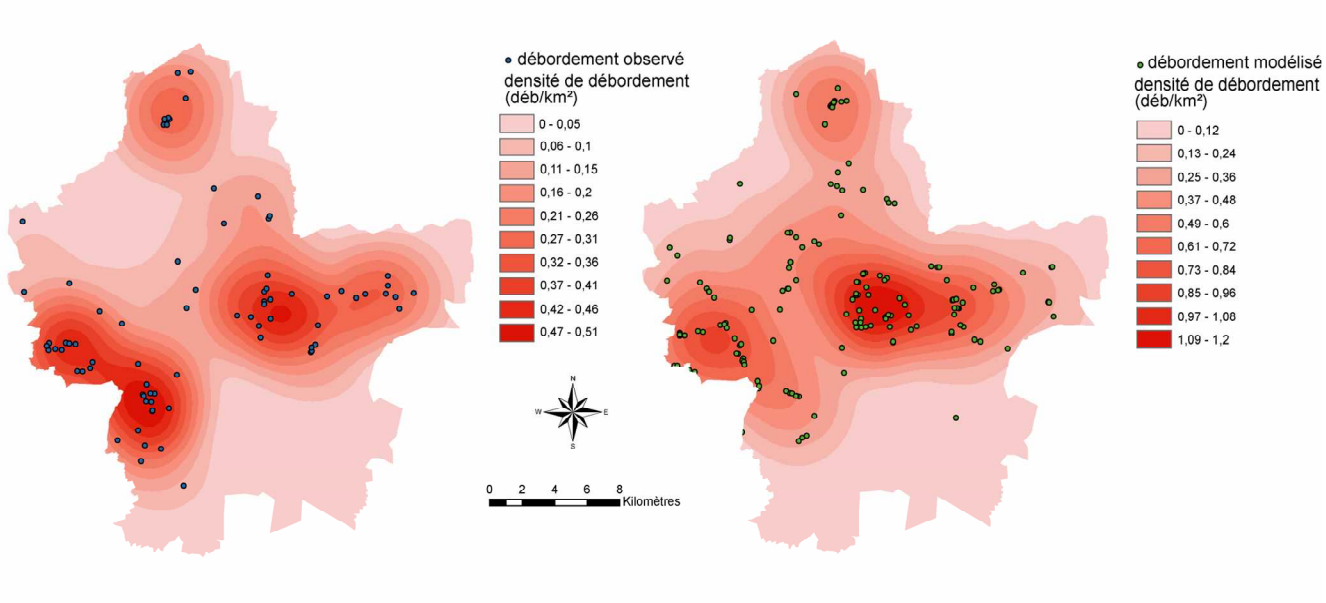


Figure 6.39 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 04 août 2004, et zones de densité de débordements associés

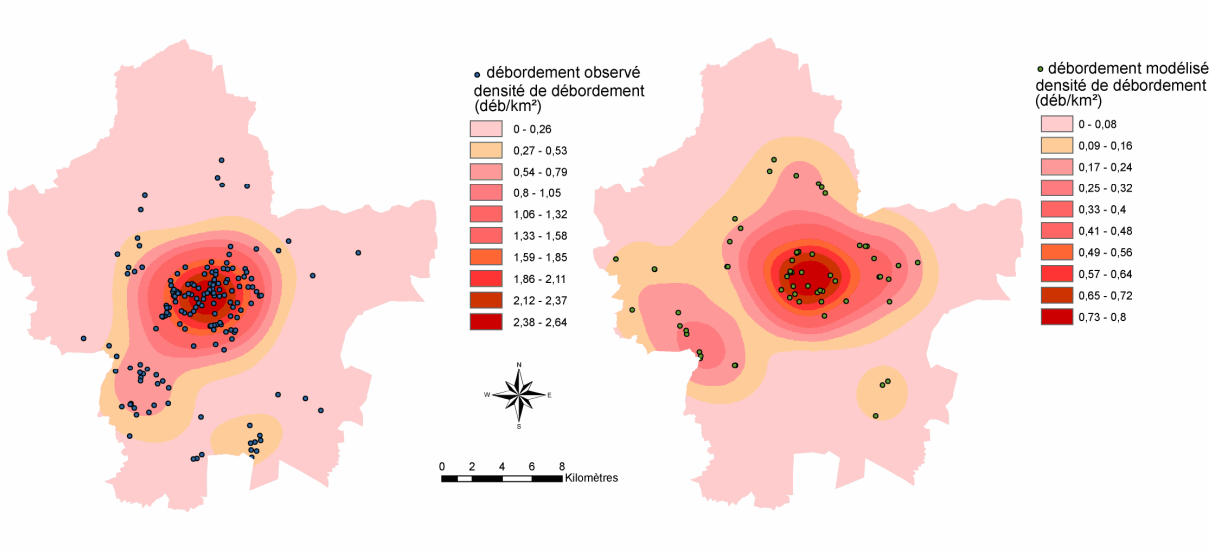


Figure 6.40 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 07 septembre 1995, et zones de densité de débordements associés

3.2.2 Des débordements simulés sur des zones où les observations sont absentes

Pour certains épisodes pluvieux de l'échantillon, nous constatons des débordements simulés qui ne trouvent pas de correspondance dans les observations de terrain. C'est le cas, par exemple, de l'épisode du 7 août 1997 (fig. 6.41) ou encore du 10 juin 2000 sur le bassin versant Pierre-Bénite, dans l'ouest de l'agglomération, dans le secteur de l'Yzeron notamment (fig. 6.42). Cette dernière simulation nous indique une trentaine de débordements modélisés, alors qu'aucune manifestation de ce genre n'a été signalée sur le terrain. Il est possible qu'une partie de ces débordements modélisés soient liés à des dysfonctionnements ou à un calage non adapté du modèle, mais cela peut aussi indiquer que la totalité des débordements réellement survenus sur le terrain n'ont pas été intégrés dans la base de données. En effet, comme il l'a déjà été précisé, ce type d'exploitation est forcément dépendant de la remontée d'information par les équipes de terrain. Il est matériellement et humainement impossible pour ces équipes de constater et de recenser de manière exhaustive tous les débordements, notamment lors de pluie intenses. En outre, des débordements peuvent survenir en des zones peu densément peuplées, ou sans dommages pour la population. En conséquence, le nombre de plainte est plus réduit que les débordements, d'où une difficulté accrue de constat et de transmission de l'information. Enfin, une difficulté supplémentaire est liée à l'homogénéisation de la remontée

d'information. La réalisation d'une base de données claire et cohérente reste une tâche ardue car elle est construite à partir d'informations émanant de fiches standardisées, mais complétées sur le terrain dans l'urgence de la situation et avec une expérience et une sensibilité propre à chaque égoutier. Il y a ici une probable sous-estimation des débordements survenus, ce qui explique aussi les différences de densité de débordement dans le premier cas de figure. Ces limites pourraient expliquer pourquoi dans certain cas les débordements simulés ne coïncident pas avec les observations de terrain.

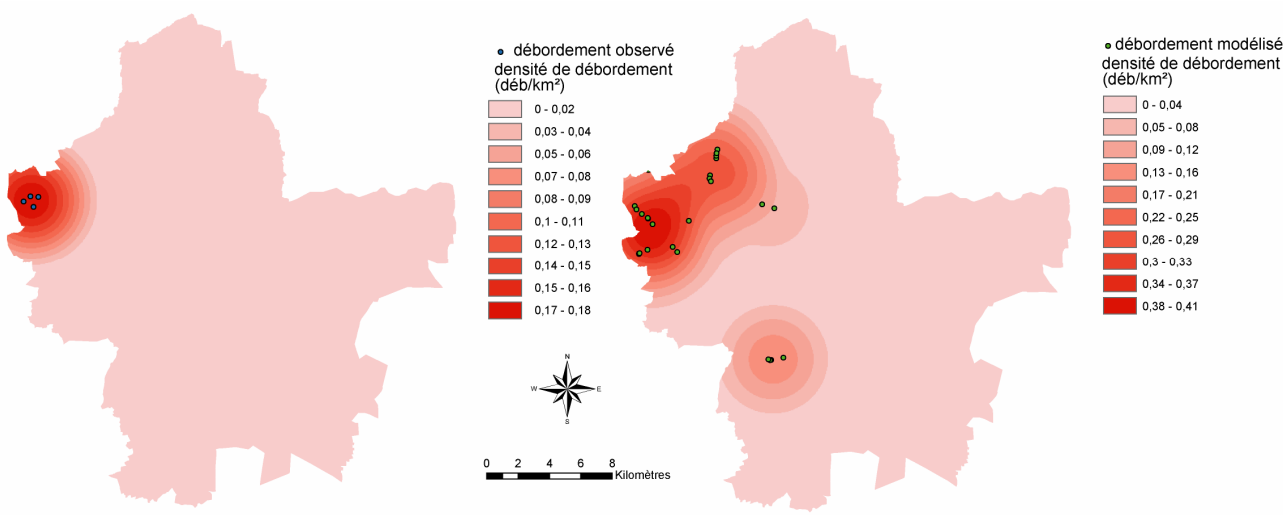


Figure 6.41 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 07 août 1997, et zones de densité de débordements associés

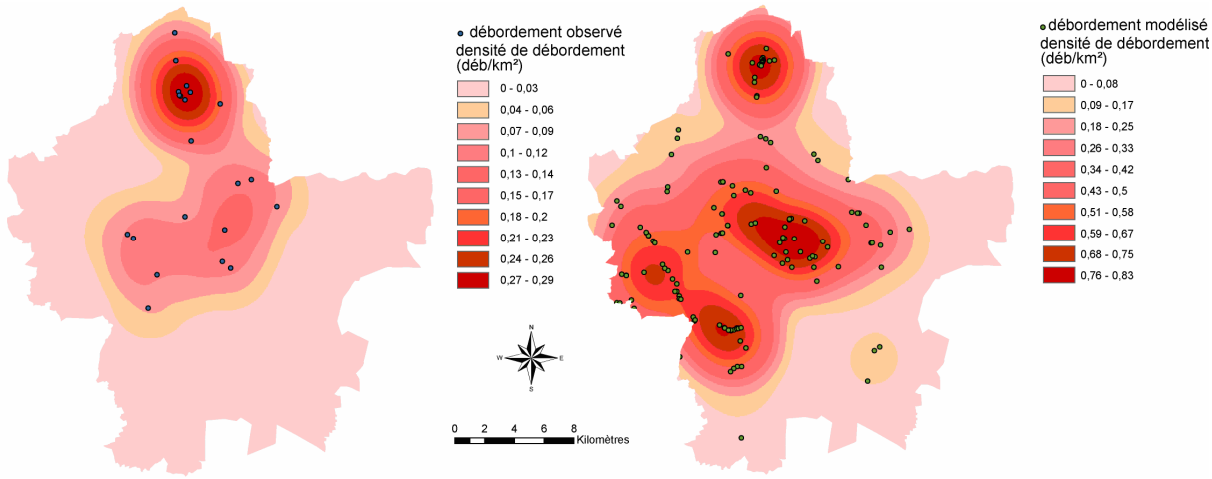


Figure 6.42 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 10 juin 2000, et zones de densité de débordements associés

3.2.3 Des décalages entre modélisation et observation sur le bassin versant de Saint-Fons

Pour ce cas de figure, nous observons des décalages situés sur le bassin versant de Saint-Fons entre les débordements simulés et les débordements observés. C'est le cas par exemple de l'épisode pluvieux du 30 juin 1997 (fig. 6.43). Les causes pouvant expliquer ce phénomène sont nombreuses. En effet, nous pouvons avancer par exemple une trop grande sensibilité de l'aval du modèle du bassin versant de Saint-Fons et un calage inadapté. Certains des débordements en outre concernent les puits d'infiltration ou le réseau d'assainissement séparatif pluvial, qui ne sont pas modélisés. Mais une des causes principales à ce décalage pourrait résider dans le fait que le modèle est plus récent que les épisodes historiques simulés. En effet, l'exemple précédent (fig. 6.44) porte sur l'épisode du 30 juin 1997, et le modèle qui a servi à la simulation date de l'année 2009. Or, entre temps, le système d'assainissement a subi de profondes modifications et des travaux d'optimisation majeurs. Ainsi, par exemple entre ces deux dates, le bassin versant de Saint-Fons a vu la création de l'émissaire de plateau du sud-est (EPSE) pour le transport des eaux usées vers la station de Saint-Fons. Cela expliquerait le décalage obtenu entre l'observation et la modélisation, et le décalage des débordements modélisés vers le centre de l'agglomération. Cette explication montre la nécessité de conserver les archives des modèles.

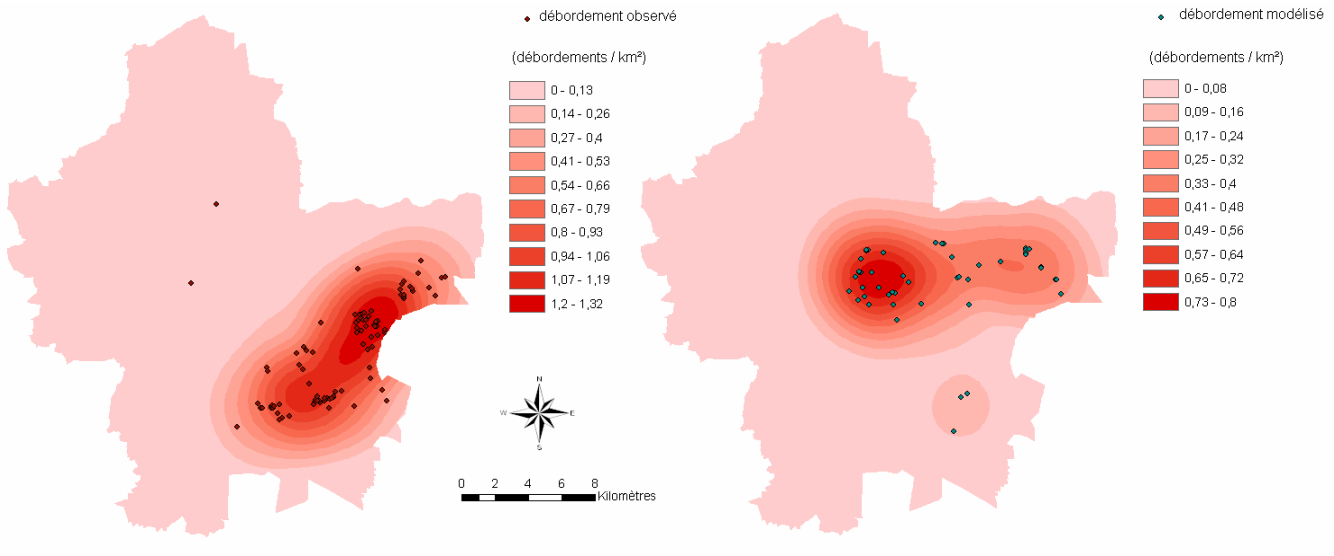


Figure 6.43 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 30 juin 1997, et zones de densité de débordements associés

3.2.4 Des observations de terrain sans équivalents modélisés

À l'inverse des cas de figures précédents, il arrive que des observations de terrain ne trouvent pas de débordements correspondant modélisés. Cependant, même si la simulation ne fournit pas de point de débordements, pour la plupart des cas, les collecteurs sont indiqués en charge et ces tronçons correspondent aux observations de dysfonctionnements. Dans le cas contraire, cela peut aussi indiquer un état défectueux des canalisations où des réparations seraient nécessaires, ce qui explique pourquoi la modélisation ne donne pas d'information.

Toutefois, l'ensemble des résultats des quatre cas de figure est très encourageant, tant pour la fiabilité des informations de terrain contenues dans la base d'observation des débordements que pour les résultats issus des simulations.

Synthèse de la partie : les débordements dépendent fortement du type de pluie

La base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie », compilée par la Direction de l'eau du Grand Lyon, est un outil très performant de suivi des dysfonctionnements de la communauté. En effet, cette base de données qui recense environ 2000 débordements sur un millier de localisations, a permis de faire le lien entre ces nuisances et les pluies à l'origine.

Dans un premier temps, la fiabilité des informations contenues dans cette base a été évaluée. Cette évaluation a confronté les débordements de la base à la distribution spatiale des pluies à l'échelle de l'événement. Ces premiers tests se sont révélés très positifs, nous obtenons en effet une très forte concordance spatiale entre les débordements observés et les hauteurs d'eau cumulées. Dans un second temps, cette base de données a été confrontée à deux autres sources d'information : un dépouillement d'articles du *Progrès*, et des fiches d'intervention du SDIS. Encore une fois, la concordance entre toutes ces bases de données était très satisfaisante. Les informations contenues dans la base « débordements » pouvant donc être considérées comme fiables, nous somme donc passé

à son analyse et à l'étude des interactions entre les différents types de débordements et les pluies à l'origine.

Les débordements se manifestent sur l'ensemble du territoire du Grand Lyon. Cependant, des particularités se manifestent dès lors que l'on s'intéresse à ces débordements en fonction du type de pluie ou de la nature de l'ouvrage en cause. Ainsi, les pluies remarquables en termes d'intensité sont nettement en cause dans la survenance des débordements, car ces dernières sont responsables de 60 % de ces nuisances (Renard et Riquier, 2008). Néanmoins, des dysfonctionnements peuvent aussi apparaître avec des pluies très faibles, aussi bien en quantité qu'en intensité, notamment lorsque le réseau ou les puits d'infiltration sont saturés, ou encore que les avaloirs sont colmatés par des feuilles d'arbre.

La dernière étape a consisté en la confrontation spatiale des débordements observés aux débordements modélisés à l'aide du logiciel de simulation *Canoe*. Nous obtenons une forte concordance spatiale dans la plupart des cas. Ces résultats permettent de valider une fois de plus la qualité des informations contenues dans la base de données « débordements », mais aussi la fiabilité des résultats de simulation du réseau d'assainissement (Renard et Volte, 2009). Cependant, il n'y a plus concordance pour un faible nombre de situations, les observations du terrain étant en inadéquation avec les résultats de la simulation. Cela s'explique par la nature même de la base de données. Cette base de données est fondée sur un recensement des nuisances sur le terrain de la part des équipes d'exploitation. Les observations ne peuvent donc pas être exhaustives, par manque de temps ou de personnel notamment. De la même manière, la modélisation présente elle aussi ses propres limites. Nous retiendrons notamment le fait principal selon lequelle seule une partie limitée du réseau est modélisée. Cependant, les conclusions issues de cette étude se sont révélées très enrichissantes pour le gestionnaire, tant sur l'amélioration de la connaissance des interactions entre les débordements et les types de pluies, que sur la confrontation des observations à la modélisation (Renard et al., 2010).

La caractérisation de l'aléa pluvial lyonnais à l'aide du réseau de mesure au sol et du radar météorologique a montré qu'aucune partie du territoire urbain lyonnais n'est épargnée par les épisodes pluvieux remarquables, et que toutes peuvent ainsi être potentiellement victimes d'au moins un des types d'inondation. Dans la continuité de ces études, les interactions entre les débordements liés au système d'assainissement et l'aléa pluvial lyonnais ont été exposées. Il en est ressorti que la quasi totalité des communes du Grand Lyon ont déjà été victimes de débordements du réseau d'assainissement. Cela se manifeste le plus souvent par la submersion de terrains et de biens, publics ou privés, de toutes natures.

Ces biens et ces terrains peuvent donc non seulement être submergés par des inondations par ruissellement urbain, mais aussi par des inondations de crues fluviales ou torrentielles, tels des débordements de cours d'eau comme le Rhône ou la Saône, ou encore de tous les ruisseaux périphériques de l'ouest lyonnais comme l'Yzeron. Les nuisances peuvent aussi en outre être provoquées par la remontée de la nappe alluviale de l'est lyonnais, par exemple.

Quelle qu'en soit la cause, ces aléas d'origine pluviale peuvent provoquer en n'importe quel endroit ou presque une submersion plus ou moins haute et étendue, dans l'espace comme dans le temps, des terrains et des biens publics et privés du territoire de la communauté urbaine de Lyon. Ainsi, pour une meilleure gestion des risques associés, après avoir participé à l'amélioration de la caractérisation de l'aléa pluvial, il nous faut maintenant nous intéresser plus particulièrement à la notion de vulnérabilité territoriale.

Partie 2 : Une méthode hiérarchique multicritère d'aide à la décision pour l'analyse de la vulnérabilité territoriale

1. La diversité des évaluations de la vulnérabilité urbaine

1.1 Limites des études de vulnérabilité urbaine

Les tentatives d'évaluations de la vulnérabilité urbaines sont extrêmement nombreuses et d'une grande diversité (Provitolo, 2002 et 2006 ; Rufat, 2009). La plupart de ces différentes études se bornent généralement à la simple prise en compte de la densité résidentielle, et les études plus pointues et complètes sont très rares (Leone, 2007 ; Hubert et Ledoux, 1999). Nous rappellerons juste que le risque est ici vu comme la probabilité d'occurrence d'un aléa dont les effets se font sentir sur la société et un territoire vulnérable. Cette vulnérabilité sera ici vue en accord avec la proposition de Gleize et Reghezza (2007) comme « la propension d'un enjeu humain, matériel, environnemental, etc. à subir un dommage ». Il sera donc considéré comme vulnérable tout enjeu dont l'intégrité se trouverait impactée par la manifestation d'un aléa sur celui-ci (Cardona, 2003 ; d'Ercole et al., 2004 ; d'Ercole et Thouret, 1996).

En effet, d'après C. Griot (2007a), « l'analyse d'une vingtaine d'études de vulnérabilité montre qu'elles ne tiennent souvent pas compte de l'ensemble des éléments vulnérables ». Nous faisons ici le même constat que cet auteur, quel que soit le territoire d'étude, à l'international comme localement. En effet, les enjeux matériels et les enjeux environnementaux sont généralement exclus de ces évaluations, et se résument bien souvent uniquement à l'analyse du nombre de résidents par Iris INSEE, ou l'équivalent à l'étranger. En outre, l'applicabilité opérationnelle de ces études est bien souvent très limitée, contrainte par des lacunes tant au niveau de l'échelle d'étude que par la nature des enjeux utilisés et de la méthode employée.

Il est donc ici nécessaire d'adopter une démarche plus complète qui englobe tous les enjeux présents sur le territoire. Précédemment un état des lieux des principales études portant sur l'évaluation de la vulnérabilité du Grand Lyon est mené, en mettant en avant leurs points forts ainsi que leurs faiblesses.

1.2 Sur le Grand Lyon : des études antérieures incomplètes

Si les aléas associés aux risques d'origine pluviale sur le territoire lyonnais ont fait l'objet de très nombreuses études spécifiques pointues (par exemple Combe, 2007 ; Delahaye, 2004 ; Paturel, 1991 ; Blanchet et Suchel, 2004 ; Chocat et Bardin, 2007 ; Comby et Rueneuve, 2004), les études qui portent sur l'étude de la vulnérabilité du Grand Lyon sont rares et ont en commun d'être relativement perfectibles. Il convient toutefois de remarquer que la gestion du risque a longtemps été focalisée sur la maîtrise de l'aléa, quel que soit son lieu d'application ou sa nature (Veyret et Reghezza, 2005 et 2006), et n'est en rien une caractéristique de notre site d'étude ou de ses gestionnaires.

Ainsi, si le cahier risques majeurs du référentiel environnemental du Grand Lyon (Grand Lyon, 2004) s'essaye à une typologie des risques basée sur des aléas de différentes natures, l'étude portant sur la vulnérabilité ne prend en compte que la vulnérabilité humaine et l'échelle d'étude est la commune. Ainsi, il n'y a pas de cartes de vulnérabilité produites, seul un graphique mentionne la part de la population du Grand Lyon exposée (« 31 % : résidente ; 29 % scolaire ; 35 % professionnelle » - Grand Lyon, 2004). Cette échelle d'analyse est bien insuffisante pour une agglomération urbaine dense de 57 communes regroupant plus d'un million d'habitants. Cet espace est marqué par une nette prédominance de l'urbanisation, mais comporte des secteurs fortement végétalisés et une morphologie urbaine peu homogène.

Une échelle spatiale plus fine utilisée sur le Grand Lyon est celle de l'îlot du recensement INSEE par S. Rufat (2007). Cependant, cette étude, identique à celle de l'agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise (2005), ne distingue pas les différents types de vulnérabilité classiquement reconnus (Tixier et al., 2006 ; Propeck-Zimmerman et al., 2007 ; Glatron et Beck, 2010). Reposant sur une classification par ascendance hiérarchique (CAH), elle ne prend en compte que la vulnérabilité humaine en secteur bâti, ignore la vulnérabilité environnementale et matérielle, et ne pondère pas les différents enjeux en fonction de leur sensibilité ou de leur importance stratégique pour l'agglomération. En outre, l'échelle d'analyse qui repose sur les Iris INSEE s'avère inadaptée aux contraintes opérationnelles du milieu, en raison de la diversité de forme et de taille de ce découpage administratif hétérogène (fig. 7.1).

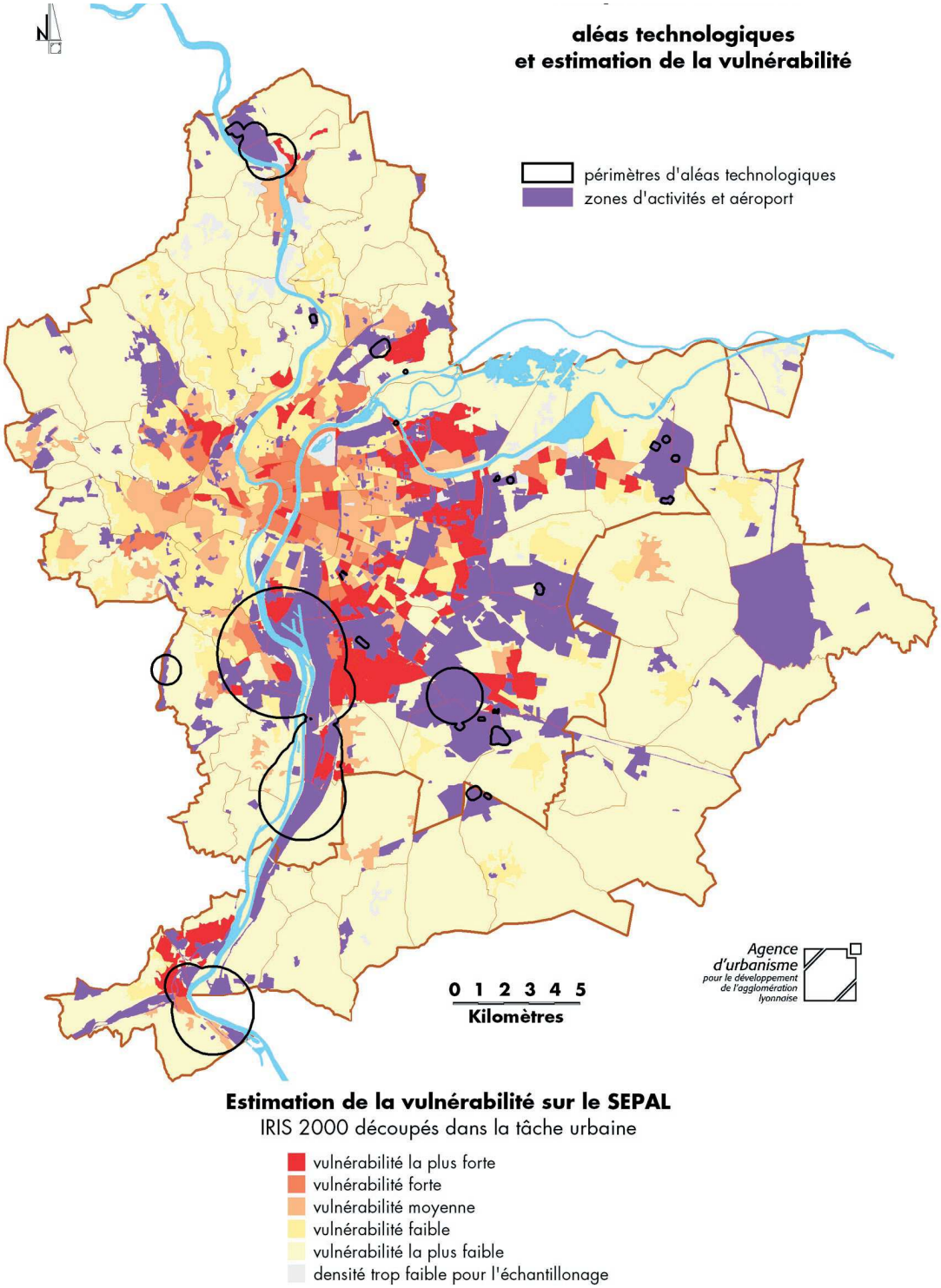


Figure 7.1 : Estimation de la vulnérabilité du SEPAL (Syndicat Mixte d'Etudes et de Programmation de l'Agglomération Lyonnaise - source : agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2005). D'après le SEPAL, les secteurs de forte vulnérabilité se situeraient dans l'est et dans le sud de l'agglomération

Le Plan de Prévention du Risque Naturel Inondation (PPRNI) du Grand Lyon (prescrit par arrêté du Préfet du Rhône le 7 janvier 2004 sur les 27 communes inondables concernées) recense quant à lui les enjeux de différentes natures, bien que sommairement, mais ne les hiérarchise aucunement. Ainsi, ce travail se rapproche plus d'un exercice cartographique de base que d'une évaluation de la vulnérabilité. Enfin, l'échelle d'analyse à la parcelle conduit aux mêmes problèmes que les études précédentes (Préfecture du Rhône, 2004).

Une des études les plus fines est menée par C. Combe (2007). L'auteur établit « une typologie sommaire des enjeux de l'inondation, sur la base des catégories souvent retenues par les méthodes d'analyse quantitative de la vulnérabilité (ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, 1999) ». Il découpe ainsi le territoire en « zones d'occupation homogène ou dominante : résidentielle, économique, agricole, récréative, d'équipement et de services, auxquels s'ajoutent les espaces naturels ». Cependant, ces zones sont trop globalisantes, les enjeux ne sont pas suffisamment détaillés pour une étude précise, et l'étude porte non pas sur tout le territoire du Grand Lyon, mais uniquement sur des secteurs bien précis des lits majeurs du Rhône et de la Saône. Enfin, les enjeux ne sont pas hiérarchisés en fonction de leur sensibilité à la submersion. Il s'agit donc plus de cartes de localisation d'enjeux que de véritables cartes de vulnérabilité territoriale (fig. 7.2).

Nous allons donc proposer ici une analyse détaillée de la vulnérabilité du Grand Lyon qui a pour but de remédier aux lacunes constatées dans les études précédentes, et qui se veut applicable d'un point de vue opérationnel et un véritable outil d'aide à la décision pour les gestionnaires de la collectivité. Pour cela, une méthode multicritère d'aide à la décision va être employée afin de hiérarchiser et de prioriser les différents enjeux. L'explicitation de son intérêt et de son principe fera l'objet des prochains paragraphes, alors que les suivants seront consacrés aux résultats de son application sur notre territoire d'étude.

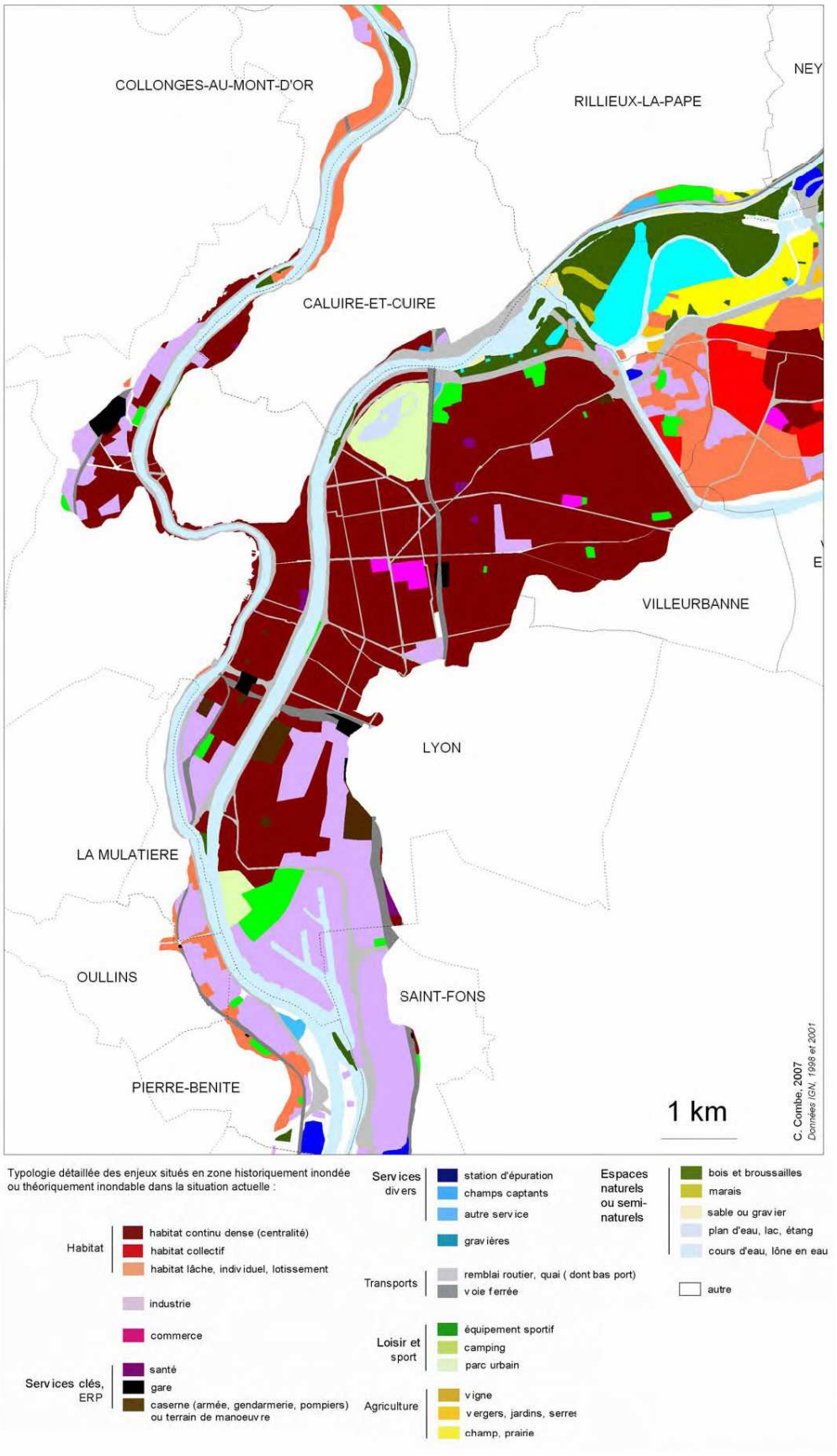


Figure 7.2 : Carte des enjeux situés en lit majeur dans le « coeur urbain » au début du XXIe siècle (source : Combe, 2007)

2 La nécessité de recourir à des méthodes d'aide à la décision

2.1 Diversité de sensibilité et de potentiel stratégique des enjeux

Le territoire urbain du Grand Lyon est naturellement constitué d'enjeux de différentes natures. Le recensement de ces derniers sur ce territoire doit tendre à l'exhaustivité afin d'essayer d'obtenir la vision la plus complète du système (Barroca et al., 2006 ; Barroca et Hubert, 2008). Ainsi, nous distinguons dans un premier temps les enjeux humains, les enjeux matériels et les enjeux environnementaux (Barczak et Grivault, 2007). Ces enjeux seront par la suite discriminés plus finement.

Ces différents enjeux sont affectés de diverses manières par une inondation et ne présentent pas la même sensibilité face à cet aléa (Tixier et al., 2006, Griot, 2003 et 2007). Ainsi, les enjeux humains sont constitués de populations diverses réagissant chacune à leur manière face à une inondation. Par exemple, « les retours d'expérience montrent […] que l'âge de la population et la plus ou moins grande mobilité sont déterminants pour la vulnérabilité individuelle, d'abord parce que les jeunes et les plus âgés ont une plus grande propension à souffrir des accidents et plus de difficultés à s'en remettre, ensuite parce que ces populations sont plus difficiles à évacuer » (Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2005).

De même, les enjeux environnementaux présentent des sensibilités différentes en fonction de leur nature. « Les terres agricoles sont plus ou moins vulnérables, en fonction […] de l'adaptation des cultures » (Combe, 2007). Ainsi les vignes sont « peu adaptées à la submersion, les cultures maraîchères et des rapports, les plus fragiles ». « Les labours sont plus ou moins vulnérables à la contrainte fluviale selon le type de culture ensemencée (le maïs, par exemple, supporte bien mieux la submersion que le blé), les prairies sont quant à elles très bien adaptées à une submersion fréquente ». Pour les espaces naturels tels que « les marais, les zones de bois et de broussailles, les bancs de sable et de graviers, les cours d'eau et lônes encore en eau, ainsi que les plans d'eau, étangs et lacs, il va sans dire

que la submersion participe du bon fonctionnement naturel de ces milieux humides » (Combe, 2007).

Nous retrouvons les mêmes mécanismes pour ce qui concerne les enjeux matériels. Ainsi, toujours d'après le même auteur, « les équipements sportifs ou de loisirs […] sont généralement peu vulnérables car il s'agit d'équipements légers qui supportent facilement la submersion ». Il en est de même pour « le réseau de transports […], surélevé pour être mis à l'abris des débordements, du moins hors d'atteinte des crues les plus fréquentes, afin de maintenir la circulation sur les axes les plus importants de l'agglomération ».

L'auteur distingue aussi les « services clés », services qui présentent une valeur, une importance ou un potentiel stratégique élevés, de par leur rôle prépondérant dans le fonctionnement du Grand Lyon, son activité économique, le service rendu aux habitants, le rayonnement de l'agglomération à l'international, etc. De la sorte, une liste qui comporte notamment les hôpitaux, les gendarmeries et les casernes de pompiers est dressée.

C. Combe différencie en outre les « services divers » comme les stations d'épuration et les zones de captage. D'après elle, « à l'inverse des services clés, les services divers ont une vulnérabilité moindre (ces équipements supportent facilement la submersion) ». Si nous partageons l'avis selon lequel les enjeux matériels ne présentent pas la même sensibilité face à la submersion, nous trouvons discutable le mode de qualification de cette sensibilité des enjeux propre à l'auteur, et les conclusions obtenues (selon nous, par exemple, les stations d'épuration ne supportent pas facilement la submersion). En outre, la distinction effectuée entre « services clés » et « services divers » est elle aussi discutable. En effet, cette distinction ne repose pas sur le degré d'endommagement encouru lors d'une submersion, mais plutôt sur le type, la nature de service rendu, c'est à dire le potentiel stratégique de l'enjeu. Il y a donc là une confusion entre la sensibilité de l'enjeu lors d'une submersion, et la valeur de son service rendu à la communauté urbaine. D'ailleurs, C. Griot (2007b) qualifie ses « services clés » d' « enjeux stratégiques importants », et non d'enjeux stratégiques sensibles ou vulnérables.

Nous allons donc nous attacher à proposer une évaluation des enjeux à deux niveaux. Le premier consiste donc à évaluer la sensibilité des enjeux lors d'une submersion, et le second appréhende le service rendu à la communauté, c'est-à-dire son importance, sa valeur ou encore son potentiel stratégique. Pour exemple, l'endommagement par un débordement du mobilier urbain semble moins préjudiciable au fonctionnement des activités de la communauté que celui du réseau de métro. De la même manière, la détérioration des gymnases ou des piscines municipales apparaît comme moins dommageable que l'atteinte à l'intégrité matérielle des casernes de pompiers, *a fortiori* en période de crise liée à une

submersion. Ces différents enjeux n'ont donc pas le même potentiel stratégique. Enfin, est-il plus préjudiciable pour la communauté urbaine que soient endommagées les zones de captage des eaux potables ou les lignes ferroviaires ?

Il est donc nécessaire d'évaluer le plus précisément possible la sensibilité à la submersion et le potentiel stratégique des différents enjeux du Grand Lyon. La conjugaison de l'évaluation de ces deux paramètres (sensibilité à la submersion et potentiel stratégique des enjeux) fournira une estimation de la vulnérabilité territoriale de la communauté urbaine de Lyon.

Cette évaluation se doit d'être relativement objective et non pas uniquement fondée sur la seule expérience de l'auteur, telles que les études précédentes sur le même territoire d'étude. Ainsi, les conclusions doivent être partagées par le plus grand nombre afin d'aboutir à un consensus en vue d'une application opérationnelle. Pour cela, des méthodes d'aide à la décision qui reposent sur des méthodes hiérarchiques multicritères et les jugements d'experts vont être utilisées.

2.2 Principes méthodologiques des méthodes multicritères d'aide à la décision

2.2.1 Des méthodes nombreuses pour des objectifs différents

Les méthodes d'aide à la décision interviennent pour faciliter les problèmes de choix de différentes alternatives, de décision ou d'évaluation dans des situations complexes, où plusieurs critères qualitatifs et quantitatifs entrent en jeu. Elles permettent d'agréger plusieurs critères avec l'objectif de sélectionner une ou plusieurs actions, options ou solutions.

Il existe plusieurs méthodes d'aide à la décision multicritères telles que :

- *la présentation de l'information en tableau,*
- *la comparaison par critères,*

- *la méthode ordinale*
- *l'aide multicritère d'aide à la décision.*

Cette dernière, à laquelle nous nous sommes spécifiquement intéressé, consiste à ordonner les alternatives sur la base soit d'un critère unique, soit de différents critères appréhendés dans leur pluralité (approche multicritère). L'objectif est de faire ressortir une ou des alternatives qui s'approchent le plus des objectifs recherchés (Cherqui, 2005). En effet, l'aide multicritère à la décision répond à quatre problématiques différentes exposées dans le tableau 7.1, où tout problème de décision se ramène obligatoirement à l'une d'entre elles (Roy et Bouyssou, 1993). "La diversité de ces méthodes réside dans la façon d'effectuer la synthèse de l'information" (Ben Mena, 2000).

Problématique	Objectif	Résultat	Procédure
α	Choix d'un sous-ensemble contenant les « meilleurs » actions, ou, à défaut, les plus « satisfaisantes »	Choix	Sélection
β	Tri par affectation des actions à des catégories prédéfinies	Tri	Affectation, segmentation
γ	Rangement de classes d'équivalence, composées d'actions. Ces classes étant ordonnées de façon complète ou partielle	Rangement	Classement
δ	Description, dans un langage adéquat, des actions et de leurs conséquences	Description	Cognition

Tableau 7.1 : Les différentes problématiques de l'aide multicritère (Adapté de Roy, 1985)

L'objectif de cette étude est de prioriser les différents enjeux en fonction de leur sensibilité face à l'aléa et de leur potentiel stratégique pour le Grand Lyon. Il est donc nécessaire de recourir à la procédure de classement (problématique γ du tableau 7.1). Dans cet objectif, trois approches opérationnelles non spécifiques d'un type de problème de décision sont classiquement reconnues et fondées sur le jugement d'expert. Ces approches, qui vont maintenant être détaillées, proposent des méthodes différentes qui présentent toutes des atouts et des inconvénients propres.

Le premier type d'approche est l'agrégation complète transitive de l'école américaine. Elle consiste à chercher l'agrégation complète des critères, avec comme hypothèse que les jugements récoltés sont transitifs et commensurables. Ainsi, le résultat de cette approche correspond à une synthèse totale des jugements de départ (Cherqui, 2005). Les méthodes les plus représentatives de cette approche sont le processus d'analyse hiérarchique (A*nalytic Hierarchy Process* (AHP) – Saaty, 1980), et le *Multi Attribute Utility Theory* (MAUT – Keeney et Raiffa, 1993).

L'agrégation partielle de l'école francophone respecte l'incomparabilité et l'intransivité afin d'établir des relations de surclassement sur toutes les actions. Dans cette configuration,

les conséquences des divers jugements sont abordées de façon partielle et le résultat n'est pas complètement représentatif des jugements de départ. Cette agrégation partielle trouve son application pratique avec des méthodes telles que Satifaction – Regret (Fustier, 1994) ou les méthodes Electre (Roy, 1985). Enfin, le troisième type d'approche est l'agrégation locale et itérative qui procède à l'exploration locale et renonce à toute vision globale. De plus, elle nécessite un investissement en temps très important de la part des intervenants (Schärlig, 1985).

L'utilisation de méthodes agrégatives, quelles soient complètes ou partielles, a pour objectif de synthétiser le problème pour obtenir une vision globale de celui-ci. Cette simplification implique nécessairement un remaniement et une perte d'information plus ou moins importante en fonction de la méthode utilisée (Cherqui, 2005). Cependant, ces méthodes restent indispensables dans notre problématique d'évaluation de la vulnérabilité et le choix d'une méthode d'agrégation est maintenant nécessaire.

2.2.2 Choix et justification d'une méthode d'agrégation

L'approche d'agrégation locale et itérative est trop chronophage et inadaptée à notre problématique qui nécessite une vision globale. Les méthodes d'agrégation partielles, avec leurs relations de surclassement, fournissent des résultats qui peuvent ne pas être complètement représentatifs des jugements de départ. En outre, d'après Schärlig (1985), « l'espoir de celui qui utilise de telles méthodes est d'obtenir un résultat clair et net ; malheureusement, cet espoir est souvent déçu car le résultat n'est pas toujours d'une grande clarté ». De plus, elles ne répondent pas à notre problématique d'évaluation d'enjeux en fonction de leur sensibilité face à la submersion et de leur potentiel stratégique.

Cette problématique correspond à une agrégation complète qui vise à inclure l'ensemble des données dans une expression mathématique, fondée sur des jugements d'experts. Cela nécessite maintenant de choisir un poids à attribuer à chacune des données, puis de combiner ces critères en un indicateur. Cette combinaison de critères est détaillée dans le paragraphe suivant.

2.2.3 Choix et justification d'une méthode de pondération

Les méthodes de pondération sont extrêmement nombreuses (Bana e Costa et al., 2003 ; Boulanger, 2004 ; Brunner et Starkl, 2004 ; Krajnc et Glavic, 2005 ; Payraudeau et

Van der Werf, 2005). Les exemples d'application le sont tout autant et abondent dans la littérature (pour exemple on peut citer Mendoza et Prabhu, 2003 ; Molines, 2003 ; Svoray et al., 2005 ; Granger et al., 2010). Les méthodes de pondération les plus fréquemment utilisées sont les suivantes :

- *Méthodes d'attribution des scores :*

Cette méthode répartit une somme de points sur l'ensemble des critères (par exemple une répartition de 100%).

- *Comparaison par paires (paired comparison ou pairwise comparison) :*

Cette méthode compare les critères deux à deux. Les plus connus sont les méthodes *Analytic Hierarchy Process* (AHP) de Saaty (1977), et la méthode Macbeth de Bana e Costa et al. (2003).

- *Analyse de jugement (judgement analysis) :*

Cette méthode évalue l'importance d'alternatives distinctes réelles ou fictives sur des échelles de 1 à 10, 1 à 20 ou 1 à 100.

- *Méthode des valeurs attendues (expected value method) :*

Cette méthode attribue des poids seulement en fonction du classement de critères et de leur nombre.

- *Technique du jeu de cartes :*

Cette méthode nécessite la distribution d'un « jeu de cartes » sur lesquelles sont inscrits les noms de critères ainsi que des cartes blanches. Le décideur doit classer les cartes. Il peut mettre des cartes *ex aequo*, ainsi que glisser des cartes blanches entre les critères (Granger, 2009).

- *Arbres des pondérations :*

Lorsque la problématique s'y prête, il est parfois possible de décomposer les critères sous la forme d'une arborescence. À partir de la pondération de chacun des embranchements, la valeur de pondération de chacun des critères correspond au produit des coefficients des sous-branches et des branches dont il est issu.

Ces méthodes de pondération présentent chacune forcément des atouts et des faiblesses dont il est nécessaire de tenir compte lors du choix de l'une d'entres elles. Leurs avantages et inconvénients respectifs sont synthétisés dans le tableau 7.2.

Avantages	Inconvénients
Méthode d'attribution des scores	
L'attribution d'un poids plus important à un critère réduit l'importance relative d'un autre élément	Difficulté d'appréhender la complexité globale de la réalité (Svoray et al., 2005)
Comparaison par paire	
La méthode est simple d'utilisation La consistance (cohérence) de l'ensemble des comparaisons est vérifiée Des logiciels utilisant cette méthode existent : Expert Choice ou MultCSync (Moffet et al., 2005) par exemple Elle permet d'appréhender la complexité du monde réel (Svoray et al., 2005)	Le choix de l'échelle allant de 1 (même importance) jusqu'à 9 (absolument plus important) n'est pas justifié mathématiquement Le temps de comparaison augmente plus rapidement que le nombre de critères (Hajkowicz et Prato, 1998)
Analyse de jugement	
Les pondérations sont fonctions des comportements révélés des acteurs et non pas de leurs préférences officielles La méthode permet la prise en compte indirecte de paramètres	Cette méthode est également plus consommatrice en temps ; pour obtenir une signification statistique, un nombre suffisant d'alternatives doit être étudié (Hajkowicz et Prato, 1998) La méthode consiste à surestimer parfois la capacité cognitive des décideurs lorsque le nombre d'alternatives est important
Méthode des valeurs attendues	
La méthode est simple et requiert uniquement de classer les critères	La pondération obtenue ne reflétera pas systématiquement des différences d'importance entre critères
Technique du jeu de cartes	
La méthode est simple est facilement utilisable	Même inconvénients que la méthode des valeurs attendues et la méthode d'attribution des scores
Arbres des pondérations	
Le nombre d'éléments à comparer est limité	La difficulté réside dans la réalisation de l'arbre

Tableau 7.2 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de pondération utilisables lors de l'analyse multicritère (adapté de Cherqui, 2005)

L'utilisation d'une méthode plutôt qu'une autre est définie par des paramètres principaux tels que la simplicité et la clarté d'utilisation, la finesse de l'évaluation, la flexibilité et le temps nécessaire à leur mise en œuvre, les ressources disponibles et le retour d'expérience. De la sorte, notre choix s'est tourné vers la comparaison par paire, et plus précisément l'*Analytic Hierarchy Process* (AHP), développé par Saaty depuis les années 70' (Saaty, 1980 et 2008).

Cette méthode présente l'avantage d'être relativement simple d'utilisation, de permettre d'appréhender le monde réel (Svoray et al., 2005), d'être souple et adaptable. En outre, il s'agit de la seule méthode qui permette de vérifier en rétroaction la cohérence de l'ensemble des jugements de comparaison. Enfin, un avantage non négligeable d'un point de vue pratique est que des logiciels adaptés à cette méthode existent, car le mode de calcul des poids de chaque critère reste assez ardu, bien qu'implémentable dans un logiciel de tableur.

L'AHP est une théorie de mesure de critères d'une situation donnée, fondée sur la dérivation de priorités d'importance relative à partir de comparaisons par paires d'alternatives homogènes partageant un attribut commun (Saaty, 1994 ; Kendrick et Saaty, 2007). Cette méthode emprunte à l'approche systémique (se focalisant sur le fonctionnement de l'ensemble) et à l'approche déductive (interrelation des parties) pour structurer une situation complexe en différents éléments pouvant interagir les uns avec les autres, afin de les quantifier pour leur attribuer des valeurs relatives à leurs impacts sur le système global (Griot, 2003 et 2007a). Cette quantification des valeurs des différents éléments repose sur l'expérience et le jugement d'experts, pour, à terme, obtenir des « priorités » des différentes composantes (Saaty, 1980) : les fonctions de vulnérabilité, directement issues des fonctions de sensibilité et de potentiel stratégique.

Cette méthode d'analyse hiérarchique multicritère repose ainsi sur cinq étapes principales qui vont être mises en œuvre dans la partie suivante :

- *une description détaillée du système étudié où plusieurs éléments et critères sont proposés pour caractériser, synthétiser la situation et décomposer le problème complexe,*
- *une construction des hiérarchies afin d'organiser les éléments et les critères pour répondre à la problématique, ceci de manière structurée et la plus complète et exhaustive possible,*
- *des entretiens semi dirigés, où les experts concernés se prononcent dans un premier temps sur les éléments qui leur semblent relativement plus sensibles à la*

submersion, puis dans un second temps, posséder un potentiel stratégique plus élevé que les autres, par comparaison par paire,

- *un calcul des priorités et de l'importance relative des éléments qui repose sur le jugement d'experts, puis une validation de la cohérence de leurs réponses,*
- *une agrégation des réponses cohérentes qui fournit les fonctions de vulnérabilité.*

3 Principes méthodologiques de l'AHP et application au territoire d'étude

3.1 Description et hiérarchisation structurée du système

3.1.1 Enjeux, facteurs de sensibilité et impacts

Sur la base de la méthodologie mise au point par Saaty, la première partie consiste en une description de la situation complexe afin d'en avoir une vision globale satisfaisante (Tixier et al., 2006). Cette décomposition hiérarchique a été réalisée en collaboration avec les experts (responsables d'unités, chargés de mission, chargés de projet, chargés d'études, etc.) de la communauté urbaine de Lyon. Ainsi, une hiérarchie spécifique au Grand Lyon est construite, fondée sur une typologie combinant les trois principales classes d'enjeux (humains, environnementaux et matériels, eux-mêmes subdivisés plus finement), les impacts et les facteurs de vulnérabilité, tels que détaillés dans la figure 7.3 (Merunka, 1987 ; Griot, 2007b).

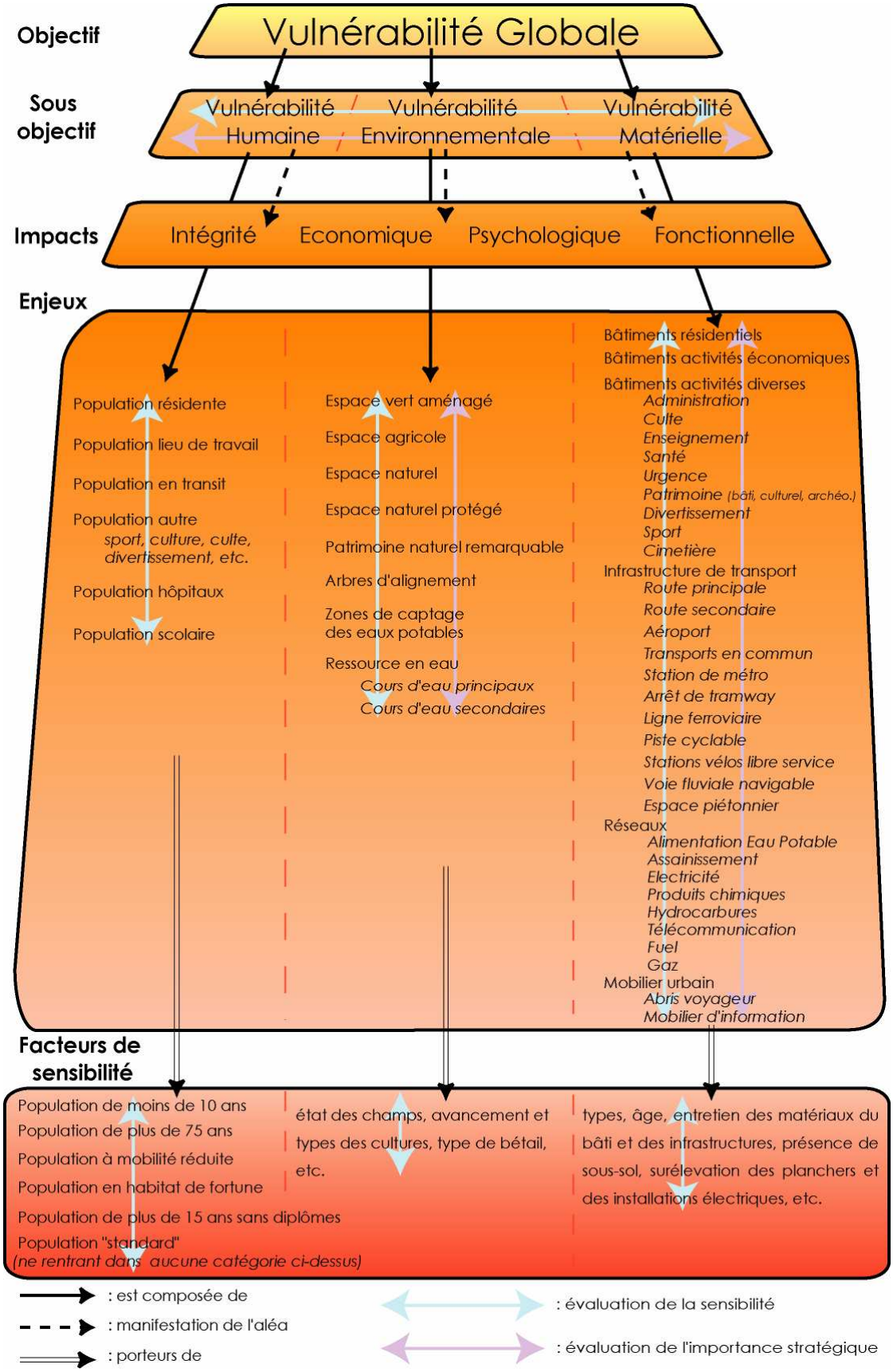


Figure 7. 3 : Décomposition hiérarchique généralisée du système spatial de la vulnérabilité lyonnaise

Les impacts, manifestations de la catastrophe qui dépasse donc le cadre de l'évaluation de la vulnérabilité, peuvent être de quatre types (Barczak et Grivault, 2007 ; Tixier et al., 2006). Le premier type d'impacts sur les enjeux humains, environnementaux et matériels est l'impact d'intégrité (ou sanitaire pour les enjeux humains). Cet impact caractérise les effets physiques pouvant survenir aux différents enjeux. Le second type d'impact est économique et qualifie les effets directs de la catastrophe liés à l'endommagement des bâtiments, des machines, des stocks ; et indirects comme la perte de production ou « d'exploitation dus à l'arrêt temporaire de la production et à l'impossibilité d'être ravitaillé » (Combe, 2007), de chômage technique ou de coût de réhabilitation. L'impact psychologique caractérise les effets de la catastrophe en termes d'influence sur un groupe de personnes (comme les effets de panique ou les traumatismes post-catastrophes). Enfin, l'impact fonctionnel qualifie la capacité de l'élément endommagé à assurer sa fonction après avoir été impacté.

Les enjeux susceptibles d'être impactés par la catastrophe tels que détaillés dans la figure 7.3, ainsi que les facteurs de sensibilité constituent le dernier niveau de cette structure hiérarchique globale des enjeux, et ce sur quoi repose cette évaluation. Les facteurs de sensibilité, comme le proposent Propeck-Zimmerman et al. (2007) ou Léone (2007), sont des caractéristiques intrinsèques de l'enjeu considéré qui affectent la sensibilité de ce dernier. Ces enjeux et ces facteurs de sensibilité ont été adaptés au territoire du Grand Lyon. Cette structure hiérarchique vise à l'exhaustivité et est spécifique à la communauté urbaine de Lyon. Cependant, cette méthodologie reste applicable à n'importe quel territoire.

3.1.2 Structuration des enjeux matériels, environnementaux et humains

Les enjeux matériels sont de six grands types : bâtiments résidentiels, bâtiments à caractère économique, bâtiments à activités diverses, infrastructures de transports, réseaux et mobilier urbain. Ces enjeux sont ensuite divisés plus finement, et peuvent être dotés le cas échéant de facteurs de sensibilité. En effet, « les caractéristiques des constructions modulent la vulnérabilité de l'habitat » (Combe, 2007). Par exemple, « les constructions en pisé sont les plus vulnérables, tandis que la pierre apporte une très bonne résistance. Concernant les constructions les plus récentes, les lotissements bon marché comportant des murs en plâtre sont exposés à des dommages importants en cas de submersion. Enfin, la présence de sous-sol ou, à l'inverse, la surélévation du niveau des planchers habitables et

des installations électriques au dessus du niveau des plus fortes crues sont autant de facteurs faisant varier la vulnérabilité » (Combe, 2007).

Les enjeux environnementaux regroupent quant à eux huit grands ensembles : espaces verts aménagés, espaces agricoles, espaces naturels, espaces naturels protégés, patrimoine naturel remarquable, arbres d'alignement, zones de captage des eaux potables et les ressources en eau. Tout comme les enjeux matériels, ces enjeux sont subdivisés et des facteurs de sensibilité peuvent leurs être affectés. Ces derniers concernent notamment l'état des champs ainsi que l'avancement et le type des cultures.

Enfin, les enjeux humains peuvent être divisés en six catégories principales : la population résidentielle, au lieu de travail, en transit, hospitalisée, scolarisée ou effectuant des activités diverses telles que celles liées au sport, à la culture ou au culte.

Ces enjeux sont pourvus de facteurs de sensibilité. Ces derniers permettent d'affiner le recours à la simple densité résidentielle. Cette densité est souvent considérée comme le facteur de vulnérabilité le plus évident (Blanchet et al., 1996). Cependant, elle retranscrit dans le même temps la concentration des ressources pouvant permettre une réaction rapide et efficace aux situations d'urgence, bien que d'après les forces de l'ordre et les pompiers (SDIS du Rhône), l'ensemble des communes du Grand Lyon soit accessible en moins de dix minutes (Rufat, 2007). Du fait de ces caractéristiques discutables, l'analyse de la population résidente se doit indubitablement d'être affinée et pondérée par des facteurs de sensibilité, tout comme les autres types de population (au lieu de travail, en transit, etc. – Ruin et al., 2007). En effet, pour un aléa similaire, les conséquences des catastrophes diffèrent d'une catégorie de personnes à une autre. D'après Dauphiné (2003), la population âgée de moins de dix ans et celle de plus de 75 ans sont les plus fragiles et les plus difficiles à évacuer en cas de nécessité. Il en est de même pour les personnes à mobilité réduite. En outre, les personnes en habitat de fortune sont plus fragiles et plus facilement exposées à toutes sortes d'aléa (Rufat, 2007). Cependant, la sensibilité d'une population donnée dépend aussi de sa réaction en cas de crise et de sa capacité à la surmonter. D'après Veyret (2003), les personnes en situation précaire sont plus fragiles en cas de catastrophes et leur capacité à surmonter la crise est réduite. De plus, le niveau d'étude a aussi été employé comme indicateur de la capacité à trouver des solutions en cas de catastrophes, capacité proportionnelle au degré de formation (Kreymer, 2003). Ceci nous amène donc à prendre en compte deux nouveaux facteurs de sensibilité qui sont la population au chômage de plus de un an et la population âgée de plus de quinze ans sans diplômes. Cependant, ces deux variables sont redondantes et présentent en coefficient de détermination par îlot INSEE supérieur à 0,7. Pour ces raisons, en accord avec des études précédentes sur ce même territoire (Rufat, 2007), et afin de ne pas pénaliser certains secteurs de l'agglomération

lyonnaise, seule la variable population âgée de plus de quinze ans sans diplômes est retenue.

3.1.3 Base de données utilisées et évolutivité

La construction de cette structure hiérarchique des enjeux s'est appuyée sur l'utilisation de deux bases de données principales. La première est le recensement 1999 de l'INSEE à l'échelle de l'îlot, pour ce qui concerne les enjeux humains. Les enjeux environnementaux et matériels ont été renseignés à l'aide de la base de données SIG interne de la communauté urbaine de Lyon, ainsi que du plan local d'urbanisme (PLU) du Grand Lyon (www.grandlyon.com/PLU). Cependant, au niveau des enjeux humains, cette étude n'a porté pour l'instant que sur la population résidente, et les facteurs de sensibilité au niveau des enjeux matériels et environnementaux n'ont pas été pris en compte. L'application de cette étude aux autres types de populations et aux facteurs de sensibilité matériels et environnementaux est une des perspectives de ce travail. En outre, pour des raisons évidentes, seule l'évaluation de la sensibilité des enjeux humains et de leurs facteurs de sensibilité a été effectuée.

Cette hiérarchisation des enjeux lyonnais a été construite en collaboration avec les différentes directions de la communauté urbaine de Lyon. Cependant, elle n'est en aucun cas définitive, et les enjeux comme les facteurs de sensibilité ont la possibilité d'être enrichis et affinés au fur et à mesure de son utilisation opérationnelle et de l'obtention de connaissance sur cette problématique. Cette capacité d'amélioration en continu, d'une d'utilisation aisée, est un des points forts de cette méthode, et favorise ainsi son usage et son appropriation par les acteurs locaux.

Nous avons vu que les enjeux qui partagent le même rang de cette décomposition hiérarchique (fig. 7.3) ne possèdent ni le même potentiel stratégique dans le fonctionnement de la communauté urbaine, ni la même sensibilité lors d'une submersion. Ainsi, la partie suivante de ce travail est de définir leur sensibilité et le potentiel stratégique en se fondant sur le jugement d'experts locaux.

L'évaluation de la sensibilité des enjeux est menée pour un niveau de submersion d'une vingtaine de centimètres par rapport au niveau du sol. Cependant, la gravité de l'inondation dépend aussi de nombreux autres facteurs. Toutefois, la littérature scientifique s'accorde sur le fait que la grandeur caractéristique à considérer est la hauteur d'eau (Degiorgis, 2006). D'autres variables comme la durée de l'événement, la vitesse de l'eau, la quantité de matière transportée ou la présence de matières toxiques peuvent également avoir un impact significatif sur les dégâts occasionnés. Outre le fait qu'elles sont fortement

difficiles à caractériser ou à estimer, ces variables sont considérées comme fortement corrélées avec la hauteur d'eau (Messner et Meyer, 2006) qui sera donc la caractéristique principale de l'aléa retenu pendant les entretiens semi dirigés menés avec les experts.

3.2 Le recours aux jugements d'experts pour le calcul des priorités

L'évaluation de la sensibilité et du potentiel stratégique des enjeux repose sur le jugement d'experts locaux, dérivé à l'aide d'un calcul matriciel. Cette quantification est fondée sur des comparaisons d'enjeux deux à deux, où il est demandé à l'expert au cours d'entretiens semi dirigés d'évaluer la sensibilité puis le potentiel stratégique des enjeux de même nature qui se situent au même rang de la décomposition hiérarchique.

Dans l'objectif de prioriser les enjeux les uns par rapports aux autres, il a été mis au point une échelle spécifique basée sur les critères de Saaty (1980). Cette grille d'évaluation possède l'avantage de mesurer des jugements subjectifs aussi bien que formellement quantitatif, afin de mesurer le degré de priorité d'un des enjeux de la hiérarchie par rapport à un autre (tableau 7.3). Ainsi, chacun des enjeux est comparé à tous les autres enjeux du même ordre (et relativement à chacun des enjeux du niveau supérieur). Cette quantification est effectuée à l'aide de matrices qui permettent de réaliser ces comparaisons d'enjeux, deux à deux, par rapport aux critères donnés (sensibilité ou valeur stratégique) (Griot, 2003). Il est donc utilisé des matrices carrées d'ordre égal aux nombres d'enjeux d'un même niveau comparé (tableau 7.4).

De ces matrices a été tiré un questionnaire, soumis lors d'entretiens semi dirigés à 18 experts, afin de prioriser les enjeux en fonction de leur sensibilité et de leur potentiel stratégique. Cette procédure se fait à l'aide d'un support *power-point* qui explique l'ensemble de la démarche, puis se conclue par le remplissage des matrices de sensibilité et de valeur stratégique d'une manière numérique.

Notre panel d'experts est constitué d'agents territoriaux des différentes directions et délégations du Grand Lyon, telles que la direction de l'eau, la délégation générale au développement urbain, la direction de la prospective et du dialogue public (ancienne direction de la prospective et des stratégies d'agglomération). L'échantillon d'experts inclut en outre des universitaires de la région lyonnaise (notamment l'INSA de Lyon ou les universités de Lyon et de Saint-Étienne), des professionnels de la gestion des eaux en milieu

urbain (Lyonnaise des eaux en particulier), et des agents de l'agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise.

Degré d'importance numérique	Degré d'importance verbale	Définition
1	Sensibilité (ou potentiel stratégique) égale des deux éléments	Les deux éléments contribuent autant à l'explication de l'objectif
3	Un élément est un peu plus sensible (ou d'un potentiel stratégique un peu plus élevé) que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle de l'expert favorisent légèrement un élément par rapport à l'autre
5	Un élément est plus sensible (ou d'un potentiel stratégique plus élevé) que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle de l'expert favorisent vraiment un élément par rapport à l'autre
7	Un élément est beaucoup plus sensible (ou d'un potentiel stratégique beaucoup plus élevé) que l'autre	L'expérience et l'appréciation personnelle de l'expert favorisent fortement un élément par rapport à l'autre
9	Un élément est absolument plus sensible (ou d'un potentiel stratégique absolument plus élevé) que l'autre	La dominance d'un élément par rapport à l'autre est démontrée par l'expérience et l'appréciation personnelle
2, 4, 6, 8	Valeurs intermédiaires entre deux appréciations voisines	Utilisées pour affiner le jugement lorsqu'un compromis est nécessaire entre deux appréciations
1/2, 1/3, 1/4, 1/5, 1/6, 1/7, 1/8, 1/9	Valeurs réciproques des appréciations précédentes	

Tableau 7.3 : Echelle de comparaison binaire (adaptée de Saaty, 1993 et de Griot, 2003)

Enjeux	E_1	E_2	…	E_n
E_1	1			
E_2		1		
…			1	
E_n				1

Tableau 7.4 : Exemple de comparaison d'enjeux d'un même niveau de la décomposition hiérarchique. Les experts comparent relativement la sensibilité (puis le potentiel stratégique) de l'enjeu e_1 de la première ligne aux enjeux e_2, e_3, … , e_n qui figurent successivement en tête de chacune des colonnes. Cette opération est ensuite effectuée pour chacun des enjeux de chacune des lignes de la matrice. Il est nécessaire de ne comparer que la partie supérieure du tableau (la partie inférieure contient les résultats réciproques).

Les matrices de comparaison renseignées à l'aide du jugement de ces experts permettent de calculer la sensibilité et le potentiel stratégique de chacun des enjeux de la structure hiérarchique préalablement établie. Cependant, afin de valider la cohérence des réponses fournies par chaque expert, un ratio de cohérence est calculé à partir des valeurs propres des matrices de comparaison. En effet, par exemple, si un expert se prononce pour un plus grand poids de l'enjeu A par rapport à l'enjeu B, et pour un plus grand poids de l'enjeu B par rapport à l'enjeu C, en toute cohérence il devra se prononcer pour un plus grand poids de l'enjeu A par rapport à l'enjeu C (transitivité des jugements). La cohérence de ces réponses est estimée à l'aide d'un ratio issu de la valeur propre des matrices de comparaison et qui doit être inférieur à 10 %. Ainsi, pour chaque matrice de jugements d'experts, seulement deux questionnaires ne se sont pas montrés cohérents. En règle générale, les questionnaires exprimaient un consensus global malgré quelques dissemblances mineures.

Les matrices incohérentes ne doivent pas être utilisées. Les calculs des priorités relatives des critères et du ratio de cohérence sont réalisables avec un fichier de tableur, mais s'avèrent relativement délicats et complexes à mettre en œuvre. Ainsi, des logiciels spécifiques existent comme *Expert Choice*^{TM} (version 11.5 utilisée dans cette étude ; Expert Choice, 2000), *Descriptor*® (Graillot et al., 2001), *Logical Decisions*®, Web-HIPRE (Mustajoki et al., 2004), ou encore *MultCSync*, de l'Université du Texas, accessible en ligne gratuitement (Moffett et al., 2005).

Un traitement spécifique est nécessaire pour agréger toutes les appréciations et les jugements des experts. Dans le cadre de l'application de la procédure d'analyse hiérarchique multicritère, la méthode d'agrégation recommandée est l'emploi de la moyenne géométrique pour reconstituer une matrice unique de comparaison (Tixier et al., 2006). Ensuite, les vecteurs propres des matrices de jugement ont été calculés pour fournir les fonctions qui déterminent les priorités.

3.3 Résultats et établissement des fonctions de priorités

Les résultats obtenus à l'aide des entretiens semi dirigés des experts locaux permettent de prioriser la sensibilité des différents enjeux du Grand Lyon lors de submersion et leur potentiel stratégique. Ces différents résultats se traduisent par l'établissement de fonctions de priorité de ces deux critères. Ces fonctions sont issues des réponses des

experts interrogés. Elles regroupent successivement tous les enjeux d'un même niveau de la décomposition hiérarchique en leur affectant un poids qui diffère selon que l'on évalue la sensibilité ou le potentiel stratégique de l'enjeu.

La fonction de vulnérabilité globale (équation a) est obtenue par le produit de la fonction de sensibilité (équation b) avec la fonction de potentiel stratégique (équation c). La fonction de vulnérabilité globale, exprimée numériquement ci-dessous et représentée graphiquement en figure 7.4, montre la part prépondérante des enjeux humains (75%) dans la fonction de vulnérabilité globale. F. Léone (2007) les qualifie même d'« enjeux suprêmes à préserver ». Les poids des vulnérabilités environnementales et matérielles sont pratiquement équivalentes, avec 12 % environ chacune. Cependant, les parts de ces enjeux environnementaux et matériels ne sont pas équivalentes dans les fonctions de sensibilité et de potentiel stratégique (figure 7.4). En effet, d'après les experts, les enjeux matériels sont plus sensibles à la submersion que les enjeux environnementaux (équation b), mais ces derniers bénéficient d'un potentiel stratégique plus élevée au sein de la communauté urbaine (équation c).

- *Equation a : fonction de vulnérabilité globale*

Vulnérabilité $_{globale}$ = **0, 7535** x Vulnérabilité $_{humaine}$ + **0,1185** x Vulnérabilité $_{environnementale}$ + **0,128** x Vulnérabilité $_{matérielle}$

- *Equation b : fonction de sensibilité globale*

Sensibilité $_{globale}$ = **0,735** x Sensibilité $_{humaine}$ + **0,064** x Sensibilité $_{environnementale}$ + **0,201** x Sensibilité $_{matérielle}$

- *Equation c : fonction de potentiel stratégique globale*

Potentiel stratégique $_{global}$ = **0,772** x Potentiel stratégique $_{humain}$ + **0,173** x Potentiel stratégique $_{environnemental}$ + **0,055** x Potentiel stratégique $_{matériel}$

De la même manière, nous obtenons une fonction de sensibilité et une fonction de potentiel stratégique pour chacun des niveaux de la décomposition hiérarchique établie (sauf pour les enjeux humains, comme il l'a déjà été expliqué, dont seule la sensibilité a été évaluée).

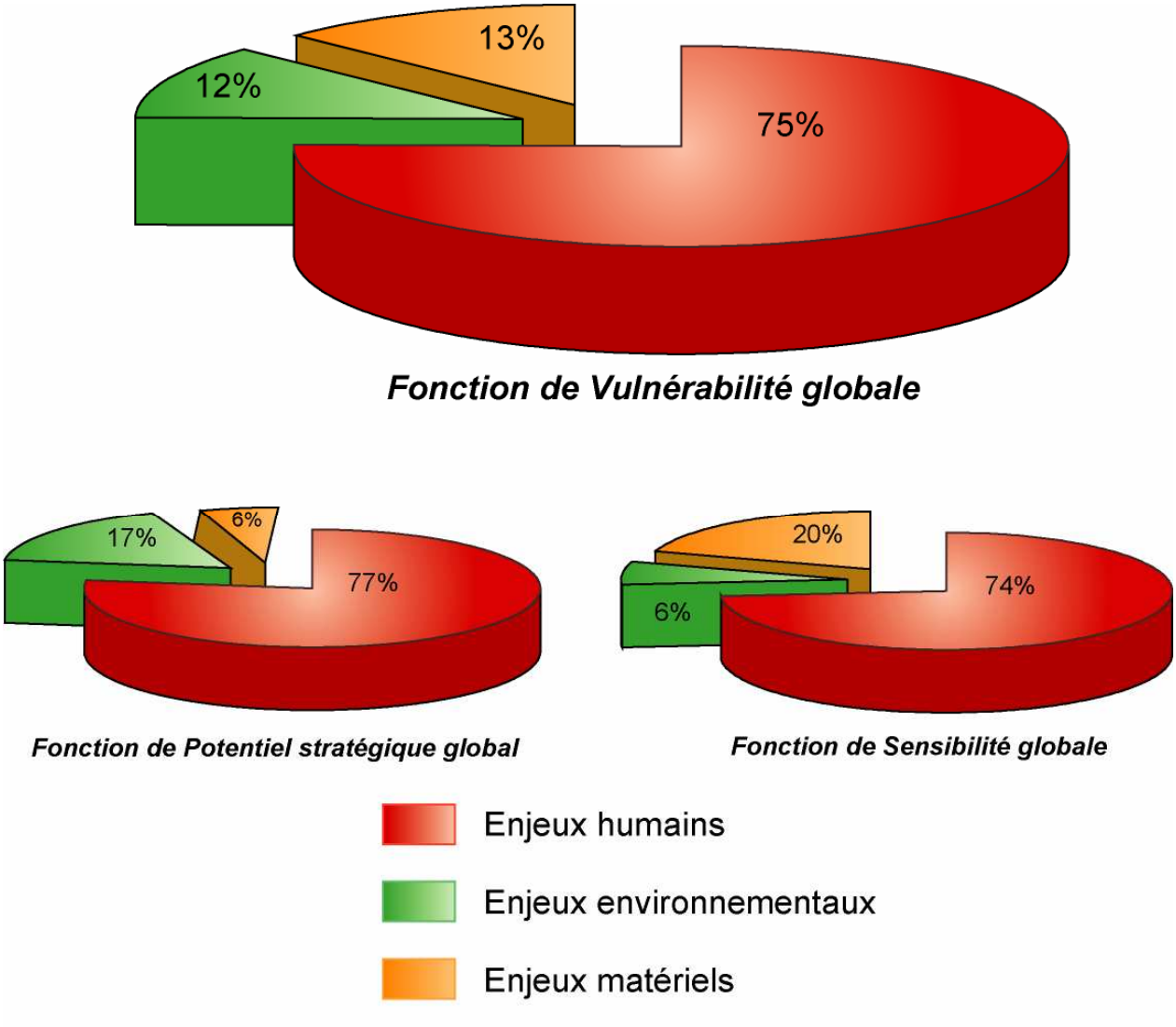


Figure 7. 4 : Priorités relatives contenues dans la fonction de vulnérabilité globale, et dans les fonctions de potentiel stratégique et de sensibilité

À titre d'exemple représentatif, la fonction de potentiel stratégique des bâtiments présentant des activités « diverses » est représentée graphiquement en figure 7.5. Nous observons, sans surprise, que le panel d'experts a placé en tête les bâtiments liés à la santé (34 % - hôpital, clinique, etc.), suivis des bâtiments servant dans des situations d'urgence (24 % - caserne de pompiers, commissariat, gendarmerie, etc.). Les bâtiments liés à l'enseignement (primaire, secondaire et supérieur) ainsi que les bâtiments administratifs (mairies, préfectures, hôtels de ville ou de communauté, etc.) occupent eux aussi une place non négligeable avec respectivement 12 % et 10 % de la fonction. Les expressions numériques des fonctions de sensibilité des enjeux humains et des facteurs de sensibilité de la population résidente sont aussi fournies respectivement ci-dessous :

Sensibilité $_{\text{Enjeux Humains}}$ = **0,132** Sensibilité $_{\text{Population résidente}}$ + **0,158** Sensibilité $_{\text{Population lieu de travail}}$ + **0,186** Sensibilité $_{\text{Population en transit}}$ + **0,17** Sensibilité $_{\text{Population autre}}$ + **0,145** Sensibilité $_{\text{Population hôpitaux}}$ + **0, 209** Sensibilité $_{\text{Population scolaire}}$

Sensibilité $_{\text{Population résidente}}$ = **0,420** Sensibilité $_{\text{Population de moins de 10 ans}}$ + **0,214** Sensibilité $_{\text{Population de plus de 75 ans}}$ + **0,196** Sensibilité $_{\text{Population mobilité réduite}}$ + **0,039** Sensibilité $_{\text{Population habitat fortune}}$ + **0,094** Sensibilité $_{\text{Population plus de 15 ans sans diplômes}}$ + **0,037** Sensibilité $_{\text{Population « standard »}}$

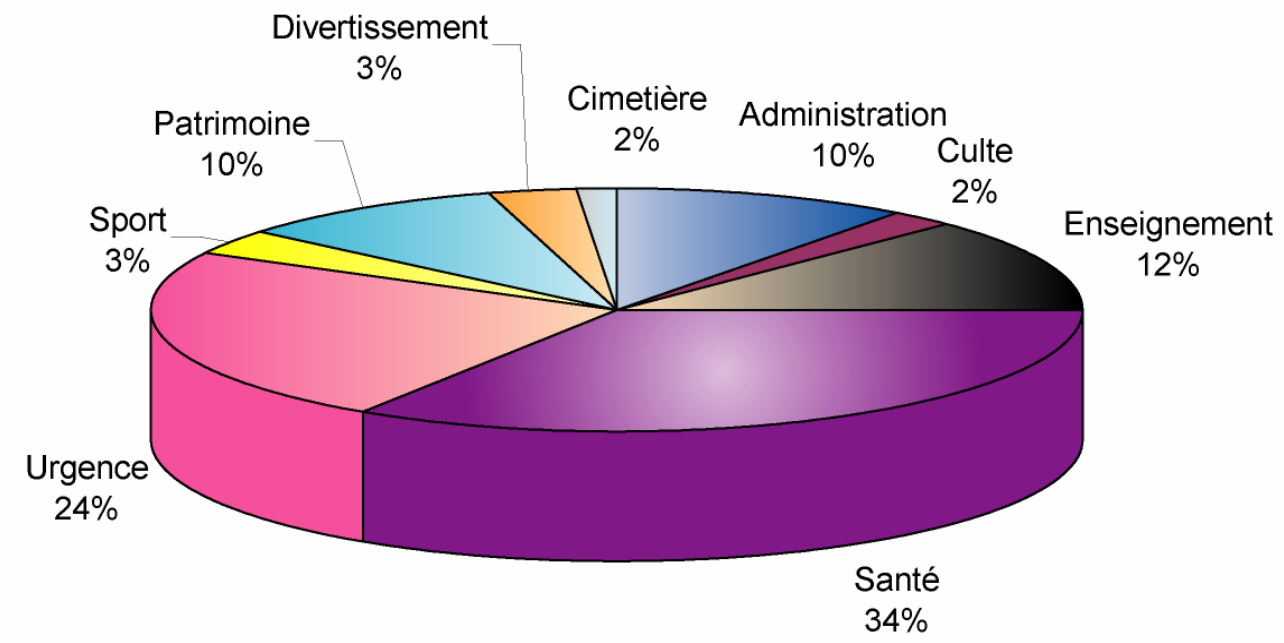


Figure 7. 5 : Priorités relatives contenues dans la fonction de potentiel stratégique des bâtiments selon leurs activités

Pour compléter les fonctions de priorité et passer à une phase opérationnelle concrète de visualisation de la vulnérabilité urbaine, il convient de s'interroger sur la pertinence du cadre de collecte et d'étude à utiliser pour une utilisation optimale.

3.4 De la méthodologie au SIG : réflexion sur le cadre d'étude et établissement de facteurs de quantification

L'*AHP* a ici pour vocation d'établir des priorités de sensibilité ou de potentiel stratégique entre les différents éléments composant l'arborescence hiérarchique (figure 7.3). Cependant, une fois ces priorités établies au travers des différentes fonctions, il convient de les concrétiser visuellement par un travail cartographique pour une utilisation opérationnelle. Il est donc nécessaire de recourir à un SIG pour spatialiser, traiter, stocker et analyser les informations hétérogènes concernant les différents éléments. Le SIG permet ainsi de cartographier quantitativement mais aussi qualitativement les enjeux selon les différentes fonctions tout en permettant une interrogation analytique (Bonnet, 2002 ; Beck, 2006 ; Beck et al., 2006 ; Provitolo, 2001 et 2007).

Cependant, la représentation graphique des enjeux se présente sous différentes natures spatiales et vectorielles : surfaciques (comme par exemple les espaces agricoles), linéaires (tel le réseau d'admission en eau potable), ou encore ponctuelles (tels les abris voyageurs). Ainsi, ils se doivent d'être rationalisés en vue de leur combinaison. Il se pose alors la question du secteur d'exploration des enjeux. De précédentes études reposaient sur les limites communales (Grand Lyon, 2004), sur l'îlot INSEE (Rufat, 2007), ou sur des « zones d'occupation homogène ou dominante » (Combe, 2007).

Cependant, en raison de leur diversité de taille, ces secteurs d'étude ne permettaient aucunement de réaliser des comparaisons quantitatives d'une zone à une autre, si ce n'est d'une manière relative en rationalisant les enjeux présents dans chacune des zones par la superficie de ce territoire. Outre des superficies très hétérogènes, les diversités de forme des communes, des îlots INSEE ou des « zones d'occupation homogène ou dominante » (Combe, 2007) ne permettaient pas une comparaison aisée d'un territoire à l'autre et nuisaient à l'interprétation des résultats. Ainsi, afin de travailler sur les données brutes (et non relatives en fonction de l'aire) et faciliter la comparaison des zones et la compréhension des résultats en s'affranchissant des limites communales ou de celles de l'INSEE, nous avons opté pour une standardisation et une homogénéisation de taille et de forme des secteurs d'exploration. Il est donc nécessaire de recourir à un maillage qui présente des secteurs de taille et de forme exactement identiques. Deux types de carroyage sont

couramment employés : la maille carrée (quadrillage) ou la maille hexagonale (fréquemment appelée carroyage en « nid d'abeilles ») (Kienberger, 2009). Nous avons choisi le quadrillage pour des raisons de simplicité de forme évidente. Ce carroyage de la zone d'étude nous semble beaucoup plus approprié et opérationnel que les échelles spatiales utilisées lors des précédentes études sur le Grand Lyon qui reposaient sur des secteurs d'exploration contraints et inadaptés.

Le SIG permet ainsi de convertir les éléments vectoriels surfaciques, linéaires ou ponctuels en une représentation sous forme maillée, en fonction de leurs aires, longueurs ou somme d'éléments ponctuels dans la maille carrée. La taille des mailles se doit d'être adaptée au niveau de précision des données, mais aussi à l'espace étudié en lui-même et à sa problématique propre (Griot, 2007). Nous avons opté pour un carroyage global du Grand Lyon de 100 mètres de côté par maille. Cette maille d'une superficie de 10 000 m² offre un bon compromis entre la taille du secteur étudié (515 km²), et le nombre de mailles ainsi créées. Nous obtenons ainsi 89 804 mailles.

Un carroyage moins fin a été utilisé au début de cette étude, avec notamment des mailles de 500 m de côté. Mais bien que le rendu cartographique permît de faire ressortir les mêmes zones vulnérables, le rendu était bien moins précis et beaucoup plus vague. En effet, l'utilisation d'un carroyage plus fin permet d'affiner quantitativement et qualitativement les caractéristiques des éléments présents et ainsi de limiter l'uniformisation de l'information, car les enjeux ne se répartissent pas forcément toujours d'une manière homogène dans la maille (fig. 7.6).

Figure 7. 6 : Exemple de carroyage à maille carrée de côté de 500m et de 100m, centré sur le 5ème arrondissement de Lyon

Une fois les fonctions de priorité établies, il convient donc de pondérer les enjeux de la décomposition hiérarchique selon la nature mais aussi selon leur emprise sur le terrain dans

chacune des mailles. Un facteur de quantification est défini comme une variable sans dimension, s'échelonnant de 0 à 1. La valeur 0 indique une absence de l'enjeu dans la maille, et la valeur 1 signifie que la quantité de cet enjeu est la plus forte comparativement aux autres mailles (Tixier et al., 2006). Les facteurs de quantification permettent donc d'obtenir une quantification normalisée pour chacun des enjeux.

Le facteur de quantification des mailles des enjeux humains H_i est déterminé selon l'équation $H_i = N_i / N_{max}$ où N_i représente le nombre total de personnes de l'enjeu humain *i* considéré dans la maille en question, et où N_{max} représente le nombre maximal de personnes de cet enjeu *i* considéré, dans une maille du territoire étudié.

Les facteurs de quantification des enjeux environnementaux et matériels sont déterminés selon leurs types de données vectorielles et leur emprise sur le terrain (superficie ou longueur de la maille couverte pour des données respectivement de type surfacique ou linéaire), ou leur somme dans la maille (pour les données de type ponctuel). Pour exemple, les facteurs de quantification des canalisations de réseaux chimiques sont déterminés en fonction de leur longueur dans chaque maille (données de type linéaire), et les facteurs de quantification du mobilier urbain sont évalués à partir de leur quantité (données de type ponctuel).

Ainsi, le facteur de quantification de données surfaciques environnementales ou matérielles est déterminé par l'équation : $S_i = M_i / M_{max}$ où M_i représente la superficie de l'enjeu environnemental ou matériel *i* dans la maille en question, et où M_{max} représente la superficie maximale de cet enjeu *i* dans une maille du territoire étudié.

De la même manière, le facteur de quantification de données linéaires environnementales ou matérielles est déterminé par l'équation $L_i = Q_i / Q_{max}$ où Q_i représente la longueur de l'enjeu environnemental ou matériel *i* dans la maille en question, et où Q_{max} représente la longueur maximale cet enjeu *i* dans une maille du territoire étudié. Il convient de remarquer que les unités des données de superficie ou de longueur sont libres (le km² peut aussi bien être employé que le m²), car l'établissement des facteurs de quantification repose sur un quotient de valeurs.

Enfin, le facteur de quantification de données ponctuelles environnementales ou matérielles est déterminé par l'équation $P_i = R_i / R_{max}$ où R_i représente la quantité d'éléments de l'enjeu environnemental ou matériel *i* dans la maille en question et où R_{max} représente la quantité maximale de cet enjeu *i* dans une maille du territoire étudié.

Ces facteurs permettent donc d'obtenir une quantification normalisée pour chacun des types d'enjeux (fig. 7.7). Pour finir, plusieurs types de résultats peuvent être obtenus : des représentations cartographiques standardisées de la vulnérabilité sur le territoire du Grand

Lyon, mais aussi de la sensibilité et du potentiel stratégique des enjeux, et cela quelle que soit la nature des enjeux et le niveau de la décomposition hiérarchique considéré.

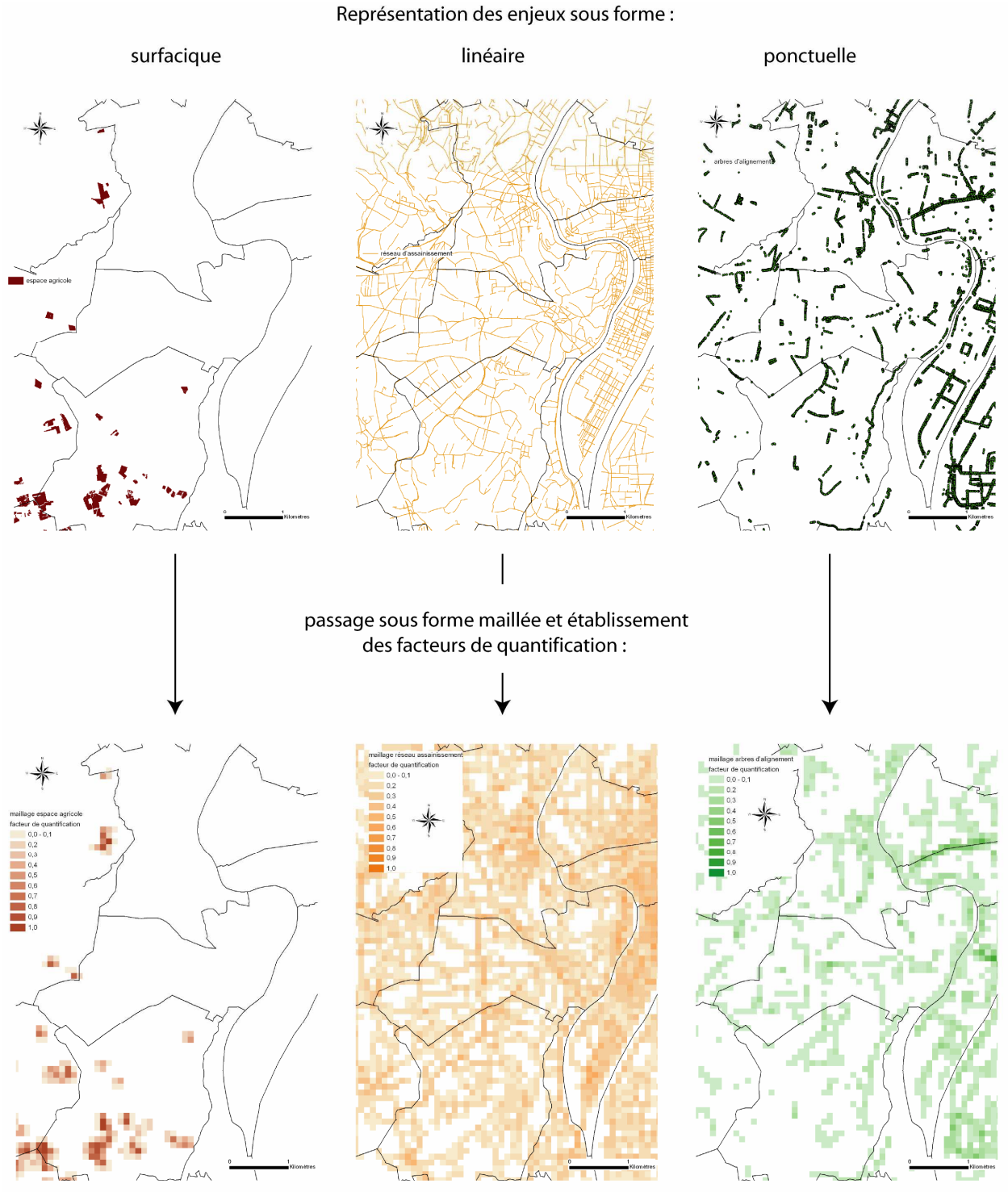


Figure 7. 7 : Exemple de conversion d'enjeux représentés respectivement sous forme surfacique (espace agricole), linéaire (réseau d'assainissement) et ponctuelle (arbre d'alignement) à une forme maillée, centré sur le 5ème arrondissement de Lyon

4 Une vulnérabilité centrée sur le cœur urbain

4.1 Application cartographique de l'*AHP* et interprétation de la variabilité spatiale de la vulnérabilité

Dans le cadre de cette étude, l'application concrète de l'*AHP* de Saaty repose sur la construction des cartes de sensibilité et de potentiel stratégique des enjeux de la décomposition hiérarchique pondérés par les réponses des experts, ainsi que de cartes de vulnérabilité. Les figures 7.8 et 7.9 représentent spatialement, qualitativement et quantitativement la sensibilité des enjeux de l'agglomération lyonnaise et leur potentiel stratégique.

Bien qu'ayant vu que les fonctions de sensibilité et de potentiel stratégique diffèrent, notamment au niveau des priorités des enjeux environnementaux et des enjeux matériels, nous remarquons la grande similitude de ces deux cartes (fig. 7.8 et 7.9). Cela s'explique par la part prépondérante des enjeux humains dans les fonctions de sensibilité et de potentiel stratégique. En effet, ces derniers enjeux représentent environ les trois quarts des fonctions de sensibilité et de potentiel stratégique, et se situent pour l'essentiel dans le cœur de l'agglomération urbaine, où les densités résidentielles sont les plus élevées.

Les figures 7.10 à 7.12 représentent les vulnérabilités humaines, environnementales et matérielles (issues du croisement des priorités de la sensibilité et de l'importance stratégique des enjeux). Pour finir, la figure 7.13 présente la vulnérabilité globale de l'agglomération du Grand Lyon.

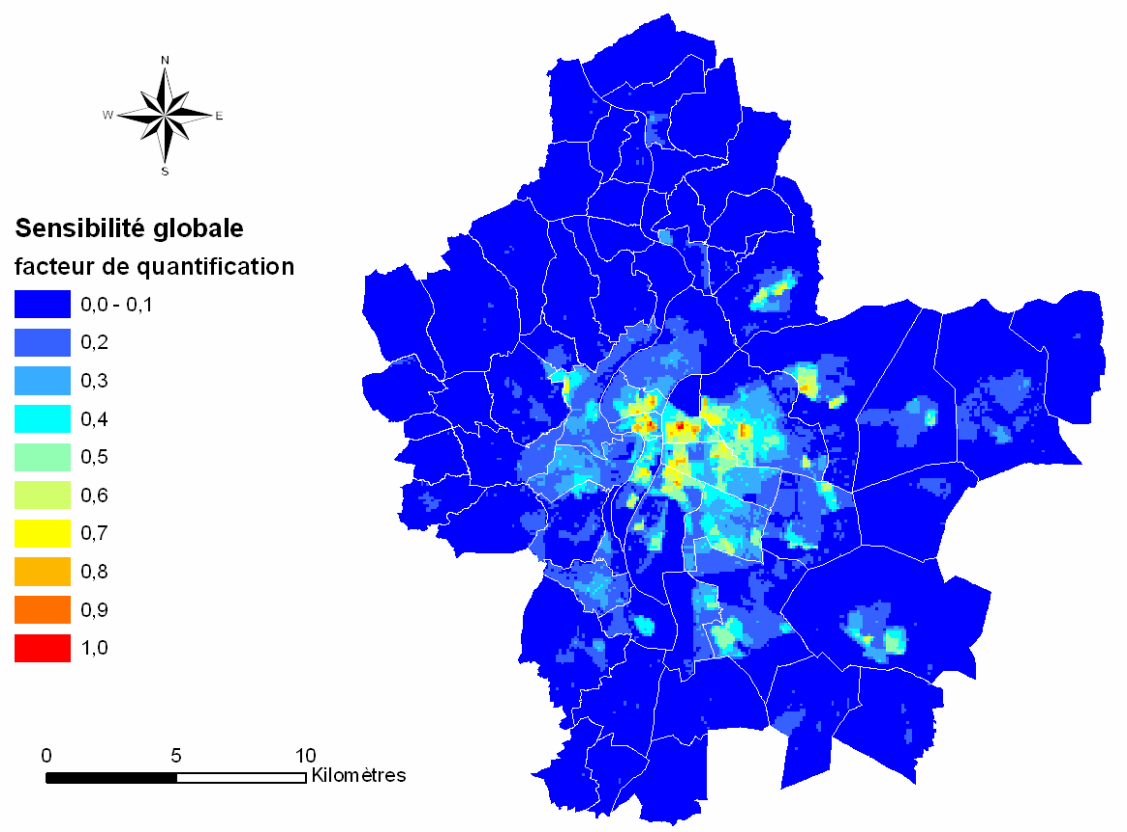


Figure 7. 8 : Sensibilité globale des enjeux du Grand Lyon

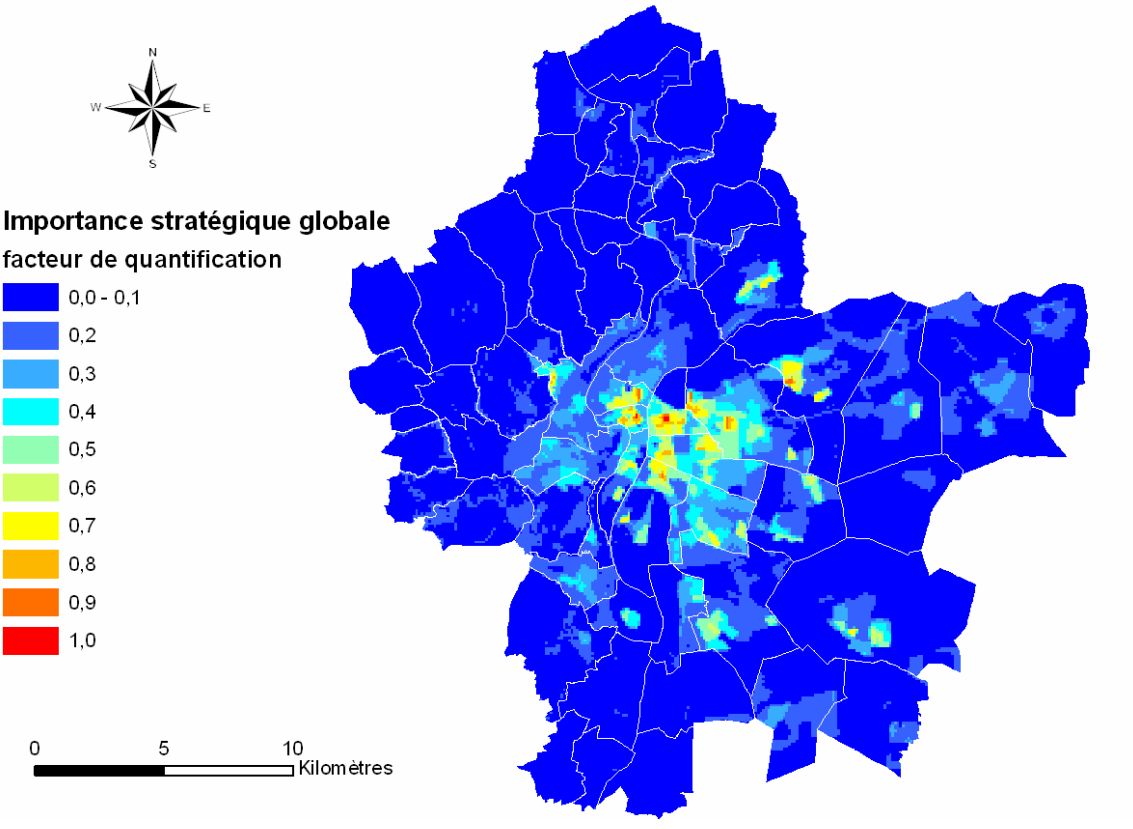


Figure 7. 9 : Importance stratégique globale des enjeux du Grand Lyon

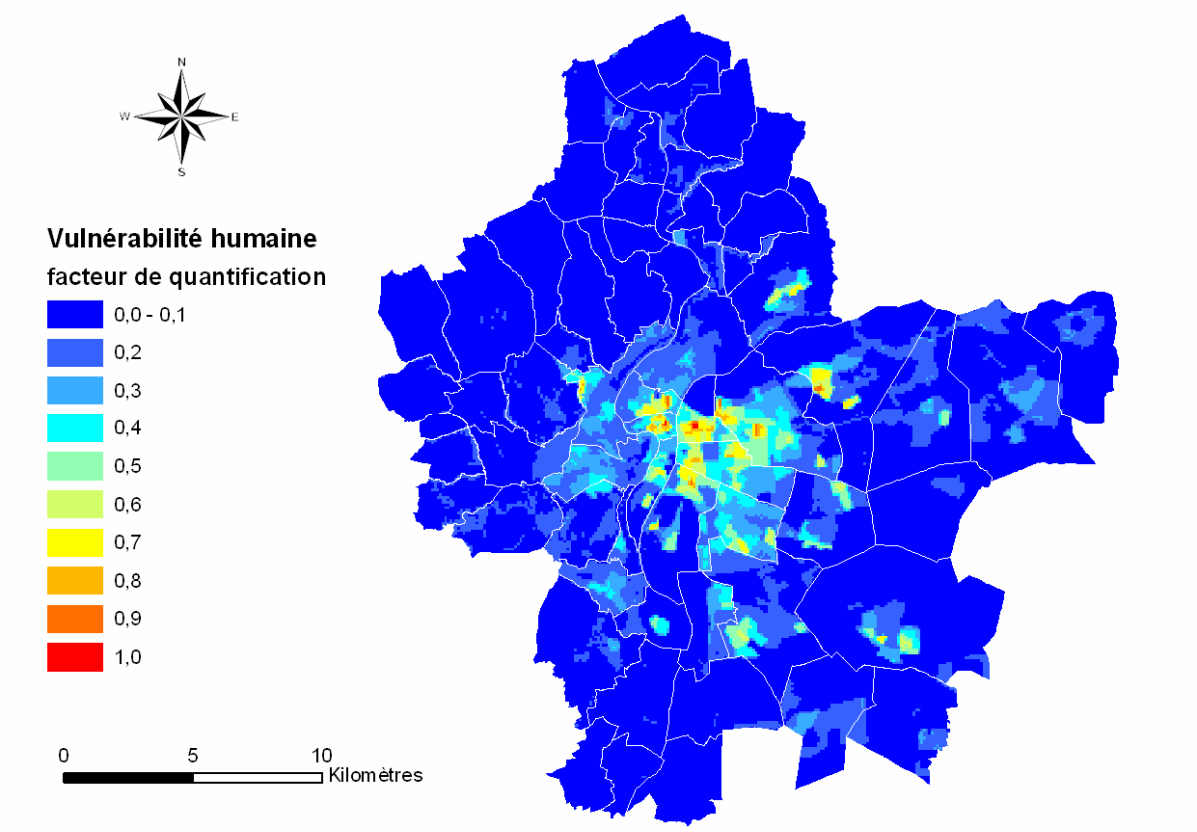


Figure 7. 10 : Vulnérabilité humaine du Grand Lyon

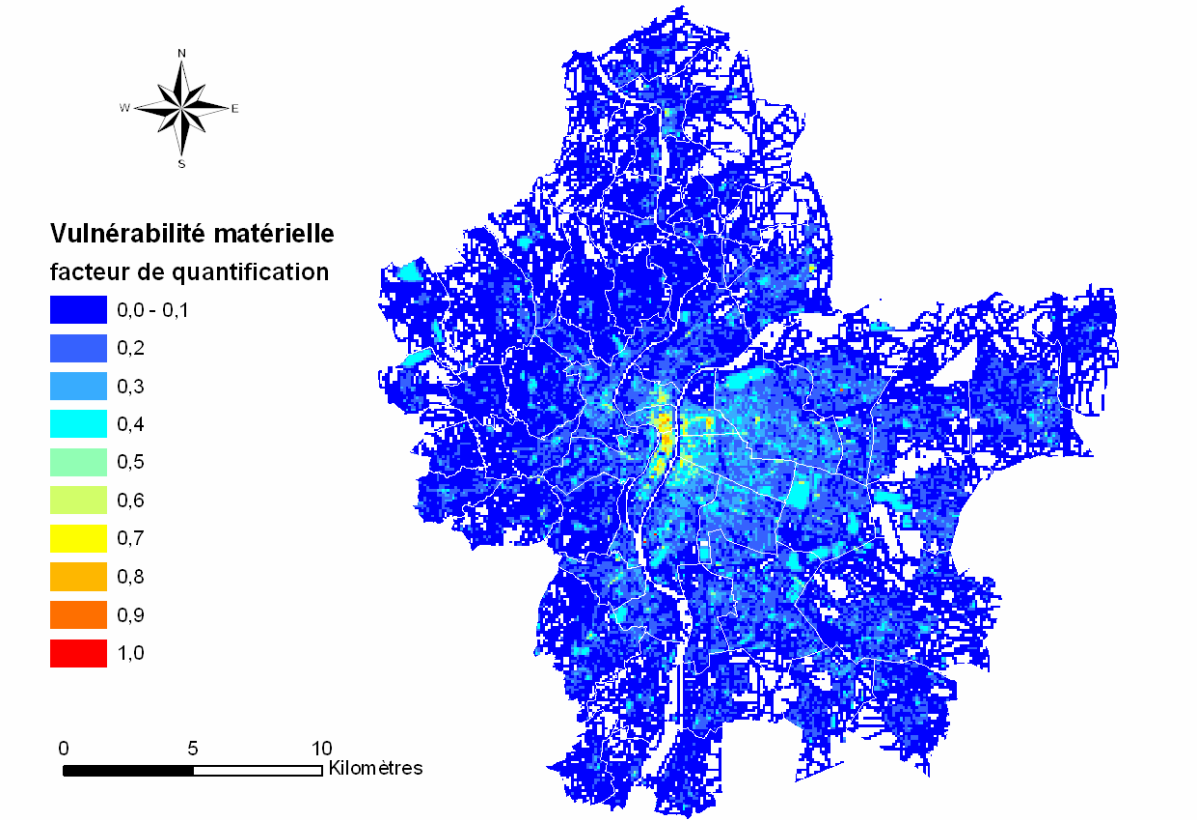


Figure 7. 11 : Vulnérabilité matérielle du Grand Lyon

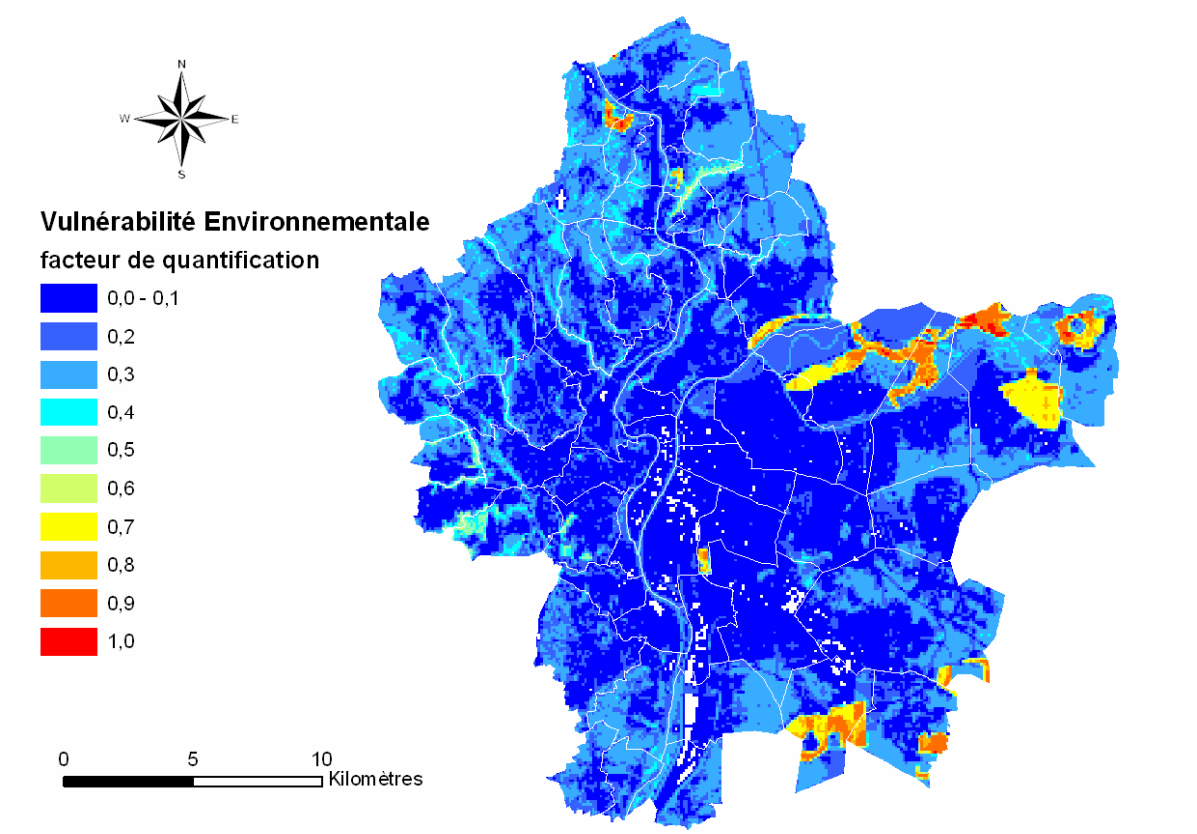


Figure 7. 12 : Vulnérabilité environnementale du Grand Lyon

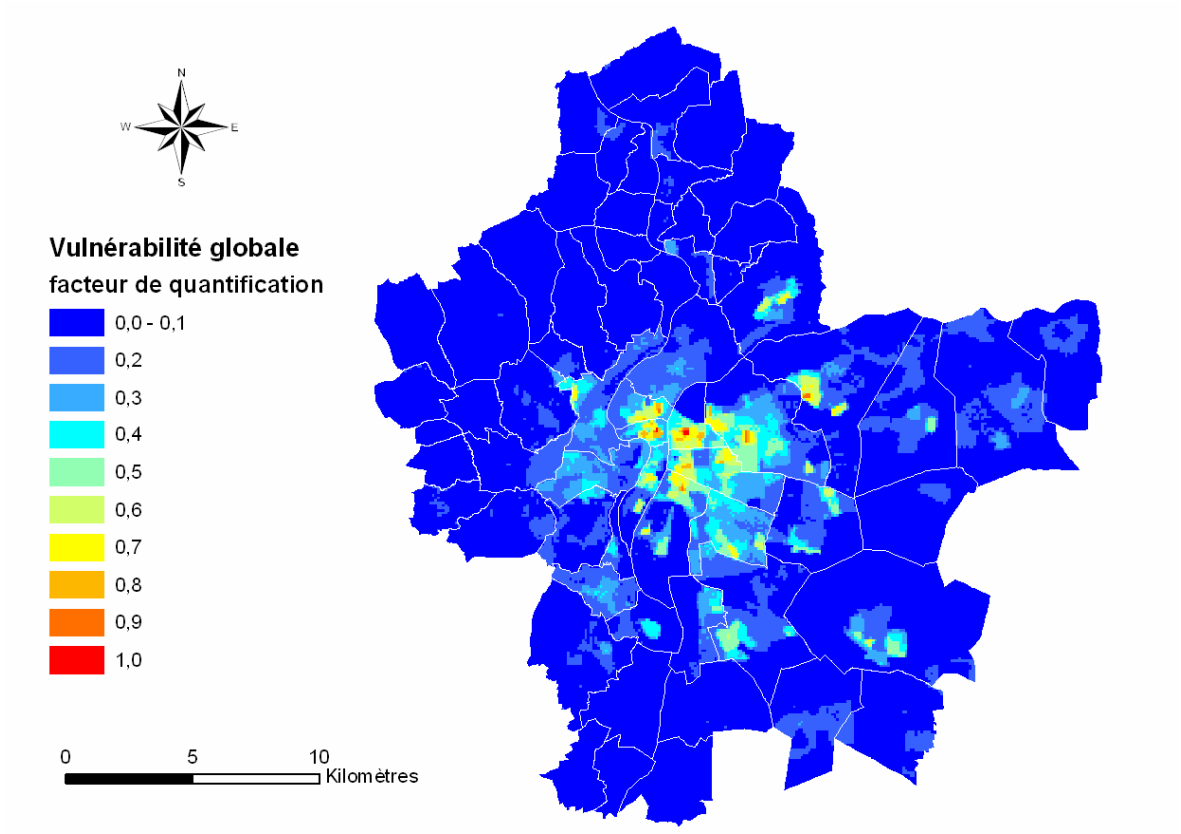


Figure 7. 13 : Vulnérabilité globale du Grand Lyon

Nous constatons que les plus forts taux de vulnérabilité se concentrent sur Lyon et Villeurbanne exclusivement. Ainsi, toutes les mailles qui présentent un taux de vulnérabilité supérieur à 0,8 (sur une échelle normalisée allant de 0 : faible vulnérabilité, à 1 : forte vulnérabilité) se positionnent dans le cœur urbain : sur Lyon (1er, 4ème, 6ème et 7ème arrondissement), sur Villeurbanne et sur Vaulx-en-Velin (fig. 7.13). Les secteurs de faible vulnérabilité se retrouvent en périphérie du Grand Lyon, mais aussi dans toute la moitié sud du septième arrondissement de Lyon. En effet, ce secteur présente une brusque discontinuité avec le reste de la ville de Lyon, et affiche des taux de vulnérabilité aux alentours des 0,05. Très peu habité et couvert de friches industrielles, il ne regroupe aucun enjeu notable.

Il ressort de ce jeu de cartes (fig. 7.10 à 7.13) la très forte similitude entre la vulnérabilité globale et la vulnérabilité humaine (fig. 7.10). Cette similitude s'explique par le fait que dans la fonction de vulnérabilité précédemment définie, la vulnérabilité globale est composée de la vulnérabilité humaine à 75 %. En conséquence, la vulnérabilité globale présente un gradient décroissant centre - périphérie centré sur Lyon et Villeurbanne suivant la densité de population. Cependant, des espaces de plus forte vulnérabilité en périphérie lyonnaise se dégagent nettement en présentant un indice de vulnérabilité supérieur à 0,5. C'est ainsi le cas de secteurs de Rilleux-la-Pape et de Vaux-en-Velin au nord-est de Lyon, de Saint-Priest au sud-est et de Vénissieux au sud. Ces zones concentrent une densité de population élevée avec des facteurs de vulnérabilité élevés, notamment des enfants de moins de 10 ans et des personnes de plus de 15 ans sans diplômes.

Ce gradient décroissant centre - périphérie de la vulnérabilité globale, déjà très largement influencé par le poids de la vulnérabilité humaine donnée par les experts du panel, est amplifié par la carte de la vulnérabilité matérielle (fig. 7.11). En effet, les enjeux matériels, comme les bâtiments ou les infrastructures de transport, se regroupent dans le cœur urbain du Grand Lyon et se concentrent dans les secteurs de forte densité de population. Pour exemple, le métro lyonnais est pratiquement exclusivement intra-Lyon. Il ne dessert que quatre communes limitrophes (Villeurbanne, Caluire-et-Cuire, Vaux-en-Velin et Vénissieux) sur les 57 communes du Grand Lyon. Il en est de même pour l'enseignement supérieur qui se répartit presque totalement sur Lyon, et sur un faible nombre de communes périphériques (notamment à Bron avec l'Université Lumière Lyon 2, à Villeurbanne avec l'INSA et l'Université Claude Bernard ou à Vaulx-en-Velin avec l'ENTPE). Cependant, les enjeux matériels sont en plus grand nombre dans la plaine de l'est lyonnais, zone d'habitat dense et industrielle, terrain actuel d'expansion des activités du Grand Lyon, et dans une moindre mesure dans la vallée de la chimie, que dans l'ouest résidentiel, clairsemé. Ainsi, certaines mailles plutôt excentrées affichent des valeurs de vulnérabilité matérielle supérieures à 0,6,

comme le secteur des Minguettes à Vénissieux. La carte de la vulnérabilité matérielle laisse apparaître des espaces « blancs » non renseignés. Ces zones vides ne sont aucunement liées à une erreur de méthodologie, mais elles correspondent à des secteurs de 100 m carrés où aucun enjeu matériel n'a été recensé. Ainsi, nous retrouvons forcément ces espaces libres d'enjeux matériels plutôt en périphérie de l'agglomération lyonnaise.

La carte de la vulnérabilité matérielle préfigure celle de l'environnement. En effet, les secteurs pauvres ou vides d'enjeux matériels de l'agglomération sont dotés de forts enjeux environnementaux. Ainsi, cette vulnérabilité environnementale se situe en majorité en périphérie. Les seules mailles qui présentent un potentiel environnemental dans le centre urbain regroupent une section de fleuves, une partie du grand parc urbain de Lyon (parc de la Tête d'Or au nord du 6ème arrondissement), ou une zone de protection des eaux potables (sud du 8ème arrondissement). Ces enjeux environnementaux situés dans le cœur de l'agglomération restent faibles au regard de la diversité de ceux présents dans l'ouest lyonnais et qui concentrent notamment des espaces verts aménagés, agricoles, naturels, et des ruisseaux. Cette carte de la vulnérabilité environnementale met en lumière les disparités existantes entre le nord et l'ouest lyonnais, et la plaine de l'est, peu concernée par les enjeux environnementaux, à l'exception des ressources en eau et des zones de captage des eaux potables. Ces zones, qui se différencient nettement sur la carte de vulnérabilité environnementale (fig. 7.12), représentent respectivement 18% et 34% de la fonction de vulnérabilité environnementale. Pour cette raison, le secteur de Miribel-Jonage à la pointe est du Grand Lyon se détache nettement (sur les communes de Vaulx-en-Velin, Décines-Charpieu, Meyzieu et Jonage), avec les taux de vulnérabilité environnementale les plus forts de l'agglomération. De la même manière, trois zones dans le sud-est lyonnais (communes de Corbas, Moins et Saint-Priest) se distinguent en raison de la présence de grandes surfaces de captage des eaux potables. Enfin, de la même façon que pour la carte de vulnérabilité matérielle, nous constatons des espaces exempts d'enjeux environnementaux, notamment dans le cœur de l'agglomération ou dans le couloir de la chimie (Bethemont et al., 1997 ; Donze, 2005 et 2007).

4.2 Le SIG pour souligner les interactions entre aléa et vulnérabilité

Ce travail, qui met en exergue la dimension spatiale de la vulnérabilité en zone urbaine, trouve son application concrète avec la superposition de couches d'aléas d'origine

pluviale. La représentation de tous les aléas issus des divers documents officiels sur la carte de vulnérabilité globale conduirait à une telle superposition de couches qu'elle en serait totalement inexploitable (Chesneau, 2006 et 2009). « Les cartes thématiques de synthèse ou d'analyse sur support fixe (papier ou écran) ne suffisent plus pour prendre en compte la complexité spatiale des risques sur le terrain » (Propeck-Zimmermann et al., 2009).

Le recours au SIG permet de visualiser efficacement n'importe quel type de relation aléa – vulnérabilité, pour plus de lisibilité, en fonction des nécessités. Cette souplesse technique de l'outil, adaptée à des circonstances d'utilisation diverses, a été très appréciée par les décideurs locaux. Cet outil permet aussi d'établir des cartes de risques par types d'enjeux, en ne retenant, par exemple, que le risque d'inondation par débordement du Rhône ou de la Saône sur les enjeux matériels, et d'effectuer des requêtes spécifiques sur chaque maille pour fournir une vision locale détaillée de la situation.

La visualisation directe du risque à l'aide de la superposition des couches d'aléas et de la vulnérabilité permet donc aux décideurs d'obtenir une meilleure appréhension du terrain. Pour exemple, la représentation sur le territoire du Grand Lyon du risque de submersion par une crue du Rhône ou de la Saône (fig. 7.14) permet de mettre en évidence la forte nécessité de prise en compte de la variabilité spatiale de la vulnérabilité. Ainsi, pour un aléa uniformément réparti sur l'ensemble du lit majeur du Rhône, la très forte disparité zonale de la vulnérabilité conduit à une gestion de ce risque qui se doit d'être adaptée très localement.

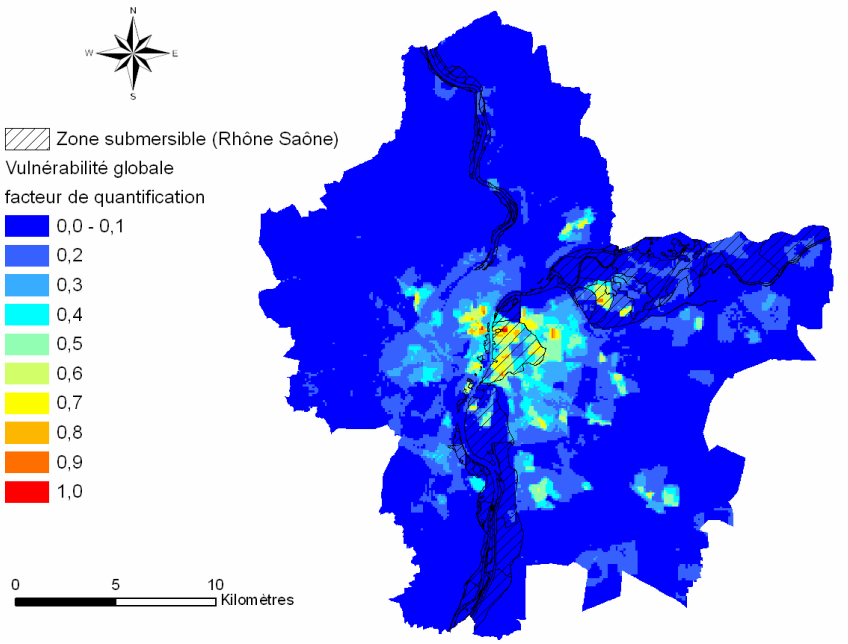


Figure 7. 14 : Risque de submersion par une crue du Rhône ou de la Saône (zonage des zones submersibles issu du PLU du Grand Lyon)

Il est aussi très utile pour les décideurs d'avoir une vision précise de la vulnérabilité sur l'ensemble de l'agglomération lyonnaise, et non en quelques secteurs seulement, car la quasi-totalité du Grand Lyon peut potentiellement être affectée par des aléas d'origine pluviale. Ainsi, la figure 7.15 représente le risque de ruissellement sur l'agglomération lyonnaise. Nous constatons que des secteurs qui ne sont pas du tout concernés par l'aléa « zone submersible » (fig. 7.14) le sont fortement par l'aléa « ruissellement » (fig. 7.15), notamment tout le nord-ouest de l'agglomération.

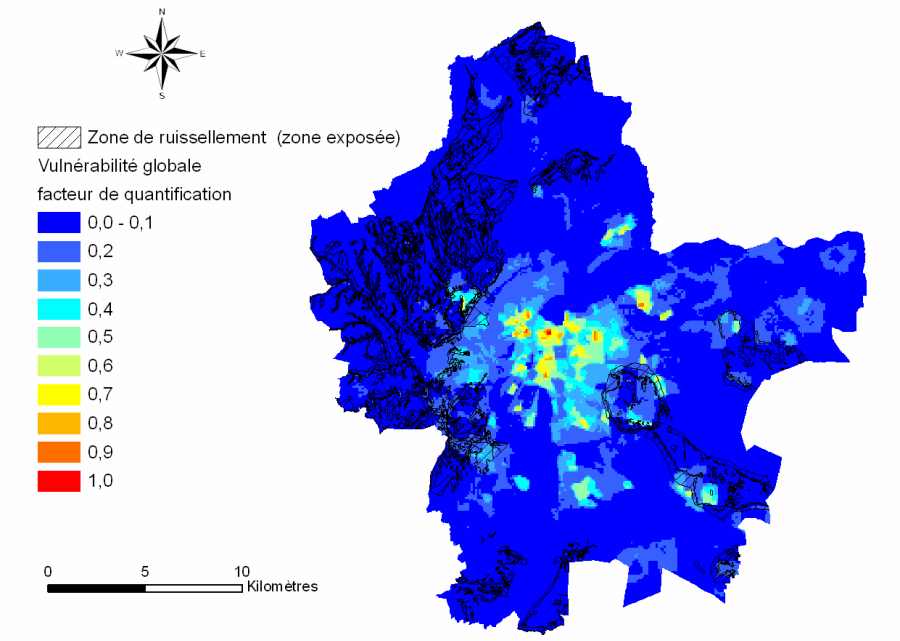


Figure 7. 15 : Risque de ruissellement (zonage des zones exposées (basse ou de passage) issu du PLU du Grand Lyon)

Si cette approche présente des intérêts multiples et opérationnels, la définition de sa valeur indicative réelle dans l'évaluation de la vulnérabilité et le traitement des risques nécessite d'en dresser les limites.

4.3 Limites et évolutivité de la méthode proposée

Cette proposition méthodologique d'analyse territoriale de la vulnérabilité, appliquée ici à l'agglomération lyonnaise, essaie de pallier les lacunes d'études antérieures sur ce même site, en recourant notamment pour la première fois à une analyse hiérarchique multicritère dans la priorisation des enjeux. Cependant, ce type de méthode qui adopte une vision

spatiale, systémique, qualitative et quantitative (Manche, 1997 ; D'Ercole et al., 1994), ainsi que les bases de données employées présentent des limites dont il est essentiel de tenir compte afin d'améliorer cette étude *a posteriori*.

La confusion dans les études précédentes entre la sensibilité à la submersion de l'enjeu et son potentiel stratégique a souvent été faite. Ainsi, cette étude s'est évertuée à distinguer ces deux facettes présentes sur un même enjeu. Or, lors des entretiens semi-dirigés, cette distinction n'a pas été facile dans un premier temps à faire comprendre aux experts. Cependant, une fois cette notion intégrée, la différenciation a bien été acceptée et n'a plus posé de problème, comme en témoigne les différences de résultats entre la sensibilité et le potentiel stratégique des enjeux matériels et environnementaux.

La méthode d'aide à la décision multicritère choisie comporte elle aussi certaines limites qu'il est nécessaire de prendre en compte, malgré son utilisation très fréquente dans de nombreux domaines divers (Al-Harbi 2001; Al Khalil, 2002 ; Nassar et al. 2003; Hill et al., 2005). En effet, l'*AHP* a parfois été remis en cause, notamment par Saaty lui-même (Saaty et Hu, 1998) ou par d'autres auteurs (Dyer, 1990 ; ou Harker et Vargas, 1990 par exemple). On retient notamment le fait que les pondérations sont attribuées indépendamment de l'échelle de variation des indicateurs. Ainsi, deux indicateurs peuvent avoir la même pondération alors que l'un a une plus grande amplitude de variation. En outre, l'introduction de nouveaux indicateurs change la priorité des autres indicateurs et une inversion de rang peut se produire. Cependant, Harker et Vargas (1987) et Perez (1995) se sont penchés sur ces critiques et ils ont prouvé (en se fondant sur un travail théorique et des exemples concrets) qu'elles ne sont pas valides.

Ensuite, il a été critiqué la validité et la légitimité des rangements opérés à partir des matrices (Dodd et al., 1995 ; Yue et al., 1998), et la comparaison deux à deux d'éléments d'un même niveau, supérieur à sept peut parfois s'avérer compliquée pour les experts (Dodd et Donegan, 1989). Ce problème peut être résolu en réalisant des associations d'enjeux qui se situent à un même niveau hiérarchique (Saaty, 1993 et 1994), en dépit de la perte de précision et de significativité induite (Dodd et Donegan, 1989). Enfin, la cohérence des jugements des experts a été évaluée à l'aide d'un ratio d'incohérence. Cependant, ce ratio a été remis en question à cause de son aspect rudimentaire et de son manque de rigidité pour les matrices d'ordre faible (Dodd et al., 1995), qui de surcroît ont plutôt tendance à se situer à des niveaux élevés de la décomposition hiérarchique (d'où une influence et une portée supérieure à des matrices d'ordre élevé proches de la base).

Concernant le territoire d'étude en lui-même, l'évaluation de la sensibilité humaine est fondée sur les données de recensement général de la population de l'INSEE qui date de

1999, et ne repose que sur la population résidentielle. L'ouverture aux autres types de population est une des perspectives de ce travail. Ensuite, le maillage de la population se fait au prorata de l'intersection entre la maille et l'îlot, ce qui suppose l'hypothèse d'une répartition homogène de la population au sein d'un îlot. En outre, il serait intéressant de pondérer nos résultats en fonction de l'heure de la journée, ou tout du moins de disposer de carte de vulnérabilité humaine diurne et nocturne. Enfin, un des experts nous a conseillé d'ajouter à la décomposition hiérarchique l'enjeu *faune urbaine*. Cependant, il n'existe pas, à ce jour et à notre connaissance, de recensement quantitatif de la sorte sur le Grand Lyon.

La représentativité du panel d'experts est une autre limite de cette méthode. Nous avons constaté que les experts fournissaient des réponses légèrement différentes en fonction de leurs métiers et de leurs spécialités, surtout pour les matrices proches de la base de l'arborescence hiérarchique. Comme le souligne Comby (2004a), les experts n'échappent pas à la question des représentations, tant dans les formes d'évaluation du risque que dans les scénarios de gestion. En cela leur jugement, même s'il est celui d'un spécialiste voire même pour cette raison, reste pour partie arbitraire (Comby, 2004b). Un consensus global se dégageait toutefois de notre panel d'experts et ne mettait en cause ni le fondement de la méthode, ni les résultats obtenus.

Enfin, il est toujours possible d'affiner cette étude, en considérant chaque enjeu comme un véritable système, « au sein duquel de multiples composantes possèdent chacune une vulnérabilité propre » (Gleyze et Reghezza, 2007). Par exemple, les réseaux d'assainissement ou d'admission en eau potable recouvrent une grande diversité d'éléments constitutifs (notamment pour ce dernier : crépine, pompe, surpresseur, vannes, stabilisateur amont/aval, réservoir aérien, etc.) qui ne sont pas affectés de la même manière par les aléas. Nous avons vu en outre que les différents types de culture ne réagissaient pas de la même manière à la submersion (Combe, 2007). Des études spécifiques impliquant des connaissances et un savoir-faire pointu dans ces domaines sont donc nécessaires si l'on souhaite travailler à ce niveau élevé de précision.

Synthèse de la partie : une plus forte vulnérabilité dans le centre urbain avec des îlots en périphérie à ne pas négliger

La première partie de ce chapitre ainsi que les précédents ont montré que l'ensemble du territoire du Grand Lyon pouvait faire l'objet d'inondation, que celles-ci soit causées par le ruissellement pluvial urbain lors d'épisodes pluvieux intenses, par une crue fluviale du Rhône ou de la Saône, ou encore par une crue torrentielle, de l'Yzeron par exemple. Des portions du territoire concentrent même ces trois types d'inondation, comme certains secteurs de l'ouest de l'agglomération notamment. En vue d'une gestion globale des risques associés, il convient donc d'analyser de manière précise les aléas à l'origine, et notamment l'aléa pluvial, auquel les chapitres un et deux sont consacrés, mais aussi la vulnérabilité urbaine.

L'intérêt porté à la vulnérabilité dans les études de risque est relativement récent. Cependant, d'une manière globale, les études qui portent sur l'évaluation de la vulnérabilité sont nombreuses et de formes très variées. Néanmoins, celles consacrées au territoire de la communauté urbaine de Lyon sont plutôt rares et ont en commun des lacunes liées à la méthodologie employée qui nuisent à leur validité. On retiendra pour l'essentiel des zones et des échelles d'étude inappropriées, un recensement incomplet des enjeux, et une confusion entre la sensibilité de ces derniers et leur potentiel stratégique.

Cette dernière partie vise donc à remédier à ces insuffisances, en prenant en compte au mieux tous les enjeux présents sur le territoire de l'agglomération lyonnaise, en distinguant la sensibilité et le potentiel stratégique des enjeux, en utilisant une analyse hiérarchique multicritère pour la priorisation de ceux-ci, et en recourant enfin à un maillage rationnel et adapté à notre aire d'étude.

Cette analyse a montré la forte prépondérance de la vulnérabilité humaine dans la vulnérabilité globale. Cela conduit à un gradient décroissant centré sur le cœur urbain, avec cependant des pôles de plus forte vulnérabilité en périphérie, influencé notamment par la vulnérabilité environnementale. Sous cet angle, cette analyse a montré aux gestionnaires la nécessité de prendre en compte très précisément et de manière très locale la vulnérabilité, en raison de la très forte variabilité spatiale de cette dernière.

Cette méthode, extrapolable à n'importe quel territoire, fournit des cartes de vulnérabilité globale mais aussi d'enjeux spécifiques, et présente l'intérêt de pouvoir les

superposer aux différentes cartes d'aléas préalablement existantes pour une lecture directe de risques particuliers. En conséquence, la vision du risque devient plus pertinente, avec la possibilité de faire apparaître de nouvelles interactions entre types de vulnérabilités et types d'aléas qui auraient pu rester masquées jusque là (Renard et Chapon, 2009 et 2010).

In fine, bien que cette étude comporte des limites dont il est nécessaire d'avoir connaissance lors de son utilisation et qui ont été exposées, son caractère innovant pour le territoire lyonnais, son évolutivité et sa souplesse d'adaptation en font un outil utile des gestionnaires. Ils pourront à leur gré, et en cas de besoin, compléter ou réactualiser l'arborescence hiérarchique avec de nouveaux enjeux, ou encore affiner les fonctions de vulnérabilité en rendant le panel d'expert plus adapté à leurs souhaits.

Conclusion générale

Ce travail de recherche, réalisé dans le cadre d'une convention Cifre au sein du service études de la Direction de l'eau du Grand Lyon, possédait deux objectifs principaux : l'amélioration de la caractérisation de l'aléa pluvial et l'approfondissement de la connaissance de la vulnérabilité du Grand Lyon. La finalité de ce travail étant de rendre plus efficace la gestion du risque pluvial en milieu urbain, notamment dans l'agglomération lyonnaise. La réalisation de ces objectifs a permis des apports significatifs à trois niveaux d'analyses complémentaires.

Sur le plan méthodologique, les résultats ont montré l'utilité forte du réseau de mesure au sol. En effet, ce type de réseau est capable d'apporter des éléments de caractérisation de l'aléa pluvial pertinent, s'il est suffisamment dense (c'est le cas dans le Grand Lyon), et si les données sont obtenues avec un pas de temps fin. Cet outil se révèle donc d'un grand intérêt pour les zones d'études qui ne sont pas couvertes par le radar météorologique. De plus, les pluviomètres sont indispensables lors de l'utilisation quantitative du radar, en vue de son calage préalable. Grâce au réseau de pluviomètres, ce travail a en outre permis de mesurer et de montrer la fiabilité des données de mesure du radar local de l'agglomération lyonnaise.

Ce travail a également permis d'améliorer la connaissance du climat urbain lyonnais sous l'angle des précipitations. Dans un premier temps, il a révélé qu'aucune zone de l'agglomération n'est épargnée par des épisodes pluvieux remarquables, toutes les zones sont potentiellement touchées. Dans un second temps, l'utilisation du radar, couplée à des interpolations et à l'analyse variographique, a permis d'améliorer la connaissance de la dynamique des phénomènes. Fort de ces constats, il a encore permis d'évaluer le rôle des facteurs locaux dans l'origine et la manifestation des pluies. Ces résultats ont trouvé des applications au niveau opérationnel.

Les comportements stéréotypés des déplacements des noyaux de pluie ouvrent, en outre, la voie à un système d'alerte et de prévision de ces derniers à un niveau opérationnel. Ces événements intenses sont responsables de la plupart des débordements recensés dans l'agglomération. Une analyse de la vulnérabilité a donc été conduite, et a mis en évidence la nécessité de prendre en compte sa forte disparité spatiale. Cette analyse devrait trouver son application sur le plan opérationnel afin de faciliter les prises de décisions des gestionnaires de l'agglomération.

Au-delà de ces grands traits, nous pouvons revenir sur les points les plus pertinents de ce travail. Une mesure la plus fiable et la plus précise possible des précipitations était indispensable pour une étude approfondie de l'aléa pluvial. Ainsi, les deux premiers chapitres de cette thèse a été consacrée pour partie à l'évaluation de la qualité des données pluviométriques utilisées. Ces dernières se sont révélées fortement contrôlées et suffisamment robustes pour être utilisées dans ce travail. C'est pourquoi l'étape consistant à évaluer différentes méthodes d'interpolation spatiale a pu être envisagée.

Le réseau de mesure au sol fournit des données continues mais ponctuelles, qu'il est nécessaire de spatialiser afin d'obtenir une vision globale du phénomène pluvieux et une vision plus fine et représentative de la distribution spatiale des pluies. Dans ces buts, des méthodes déterministes et stochastiques ont été évaluées à l'aide de validations croisées sur plusieurs types d'événements pluvieux. Il en est ressorti une relative proximité dans la qualité des résultats selon les différentes méthodes d'interpolation, aucune ne s'est vraiment révélée meilleure qu'une autre. Ce nivellement par le haut des méthodes trouve une explication dans la densité du réseau de mesure utilisé, qui est parmi les plus denses de France, voire d'Europe. La méthode de krigeage ordinaire a toutefois été retenue, car elle fourni globalement de très bons résultats lors de l'évalution par validation croisée, quel que soit le type de cumul à interpoler, mais aussi parce que sa mise en œuvre nécessite une analyse variographique préalable, riche d'information. Cette variographie a constitué un des principaux outils de l'analyse de l'aléa pluvial à l'aide du réseau de mesure au sol, en association avec des interpolations spatiales à pas de temps fin.

Les apports sur la connaissance du climat lyonnais sont multiples. En effet, les résultats à pas de temps long, à l'échelle annuelle, saisonnière ou mensuelle, confirment les conclusions des études antérieures, avec la mise en évidence d'un gradient croissant orienté de l'ouest vers l'est de l'agglomération. À pas de temps court, le couplage de la variographie aux interpolations spatiales fines a permis de révéler des informations inconnues jusqu'alors, notamment à l'échelle des épisodes pluvieux. Dans un premier temps, les épisodes pluvieux remarquables en termes d'intensité, de hauteur d'eau précipitée ou de durée concernent tous les secteurs de l'agglomération, et aucun n'est systématiquement plus touché qu'un autre. En outre, l'analyse variographique des hauteurs d'eau de ces épisodes a révélé des déploiements préférentiels orientés globalement d'une quarantaine de degrés par rappot au Nord. Ces déploiements ont été confirmés par les interpolations spatiales à pas de temps fin, et ont apporté des informations supplémentaires. En effet, si la variographie nous renseignait sur l'orientation des épisodes pluvieux, les interpolations à pas de temps fin ont précisé les trajectoires des noyaux de pluie intense. Le couplage de ces deux méthodes a donc permis de constater que la très grande majorité des épisodes pluvieux remarquables provenait du

sud-ouest et suivait une trajectoire rectiligne qui se révélait nettement sur les cumuls des hauteurs d'eau de ces événements. Ces premiers résultats ont été confrontés au second outil d'étude de l'aléa pluvial lyonnais : le radar météorologique.

Comme pour celle portant sur le réseau de pluviomètres, la première étude concernant le radar météorologique a été d'évaluer sa qualité de mesure. Cette évaluation a reposé sur une étude par simulation, complétée par une étude fondée sur les données réelles d'épisodes historiques. Trois temps se dégagent nettement dans l'utilisation du radar météorologique local. Le premier porte sur l'utilisation du radar lorsque celui-ci était positionné sur le site de l'aéroport Saint-Exupéry. Les données issues de cette période sont très dégradées et leur exploitation n'est pas envisageable. Ainsi, Météo-France a déplacé le radar en 2001 à une quarantaine de kilomètres au nord-ouest de l'agglomération. Ce déplacement a coïncidé avec la mise en place des lames d'eau *Hydram*. La qualité de ces lames d'eau est nettement meilleure que les données issues du site précédent, mais certaines zones se trouvaient affectées par des problèmes d'échos fixes, notamment dans l'est de l'agglomération. En conséquence et depuis 2006, Météo-France a mis en place sa dernière génération d'estimation de lames d'eau, dénommée *Panthere*. Ces lames d'eau bénéficient de nombreuses améliorations technologiques que nous avons détaillées, dont les répercussions se font sentir sur la qualité. Ces données, sur l'agglomération lyonnaise, sont ainsi désormais d'une qualité très fiable, et cela même durant des épisodes pluvieux remarquablement intenses, avec la disparition presque totale des échos fixes.

La bonne qualité des données du radar de Saint-Nizier a permis d'envisager l'étude dynamique descriptive de l'aléa pluvial. Cette étude dépasse le cadre géographique du Grand Lyon, pour embrasser l'ensemble de la zone de couverture du radar, qui reste toutefois centrée sur l'agglomération urbaine. Une méthode originale, exclusivement fondée sur l'usage d'un SIG, a permis de faire ressortir des informations cruciales sur les noyaux de pluie intense et les trajectoires associées. Ainsi, dans un premier temps, les noyaux de pluie intense ne se concentrent pas plus dans les zones urbaines et dans les secteurs à forte topographie que dans les secteurs ruraux peu élevés. Ensuite, les trajectoires des noyaux de pluie intense des épisodes étudiés sont très rectilignes, parfois même perpendiculaires aux crêtes des massifs montagneux, et d'une vitesse moyenne de 40 km/h environ. La confrontation des trajectoires des noyaux de pluie intense obtenues à l'aide de l'étude des données radars aux résultats issus de l'analyse du réseau de mesure au sol montre une nette concordance. Nous retrouvons en effet la principale direction des noyaux, qui vont du sud-ouest au nord-est. Toutefois, le radar météorologique offre une précision et une qualité de mesure bien supérieure à un réseau de mesure au sol, ce qui en fait désormais un outil indispensable pour l'étude de l'aléa pluvial et des nuisances associées.

En effet, l'agglomération lyonnaise est ponctuellement touchée par des inondations par ruissellement urbain, mettant en cause le fonctionnement du système d'assainissement. Il était donc nécessaire pour les gestionnaires de ce réseau d'obtenir des informations sur les origines de ces dysfonctionnements, notamment sur les pluies les plus propices aux débordements. Cette étude a trouvé son fondement dans l'analyse de la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie », qui recense environ 2000 débordements. Cette base a ainsi permis de faire le lien entre les différentes pluies et les divers types de débordements associés. La première partie a été consacrée à l'analyse de la fiabilité des informations contenues dans cette base. Cette évaluation est fondée sur des confrontations d'occurrences de débordements et de distribution des épisodes pluvieux associés. Cette comparaison s'est révélée très concordante car les nuisances se manifestent précisément dans les zones qui présentent les plus fortes hauteurs d'eau cumulées.

Pour compléter cette première analyse, les débordements de la base du Grand Lyon ont été comparés aux débordements consignés dans les bases de données complémentaires, issus du dépouillement des articles du *Progrès* et des informations fournies par le SDIS. Encore une fois, la concordance entre les informations contenues dans ces diverses bases a été très forte, car pour un même épisode, les débordements signalés dans les différentes bases de données se recoupent. Les informations de la base de données « débordements » étant fiables, il était alors possible de détailler finement les relations entre la pluviométrie et les débordements.

Ces analyses ont mis en évidence que les débordements se manifestaient sur l'ensemble du territoire du Grand Lyon, mais que l'on pouvait distinguer des particularités dès lors que l'on s'intéressait à ces débordements en fonction du type de pluie ou de la nature de l'ouvrage en cause. Ainsi, les pluies remarquables en termes d'intensité sont nettement les plus préjudiciables, car ces dernières sont à l'origine de 60 % des débordements recensés. Néanmoins, les débordements peuvent aussi survenir avec des intensités et des hauteurs d'eau précipitées très faible, notamment lorsque le réseau est saturé ou mal entretenu, en particulier lorsque les avaloirs sont colmatés par des feuilles d'arbres.

Une fois ces résultats acquis, la deuxième étape de cette étude a porté sur la confrontation des débordements observés sur le terrain aux débordements modélisés à l'aide du logiciel de simulation *Canoe*. Une forte concordance spatiale est obtenue dans la plupart des cas. Ces résultats permettent ainsi de valider la fiabilité des informations contenues dans la base de données « débordements », mais aussi la qualité des sorties de simulation du réseau d'assainissement. La distribution à grande échelle des nuisances liées

à la pluie nous a enfin amené à nous interroger sur la nécessité de la prise en compte de la vulnérabilité urbaine dans la gestion du risque inondation.

Depuis ces dernières années, les méthodes d'analyse de la vulnérabilité se sont multipliées, et leurs objectifs, leurs formes comme leurs méthodologies sont très variables. Peu d'études antérieures ont porté sur l'analyse de la vulnérabilité du Grand Lyon. Cependant, ces études souffraient de lacunes méthodologiques qui nuisaient à leur représentativité et à leurs valeurs indicatives et opérationnelles. Elles possédaient par exemple des échelles d'analyses inadaptées, un recensement des enjeux incomplets, ou encore une confusion entre la sensibilité des enjeux et leur potentiel stratégique. Ainsi, il était donc indispensable de proposer une méthodologie qui puisse combler ces insuffisances en prenant en compte au mieux tous les enjeux du territoire urbain lyonnais. Nous avons en outre distingué la sensibilité à la submersion du potentiel stratégique des enjeux lyonnais. Une analyse hiérarchique multicritère a été utilisée pour la priorisation de ceux-ci, en recourant aussi à un maillage rationnel et adapté à l'aire d'étude en question.

Les conclusions ont montré que la vulnérabilité globale reposait pour la plupart des cas sur la vulnérabilité humaine, qui conduit à un gradient décroissant centré sur le cœur urbain. Cependant, il se dégage en périphérie des secteurs de plus forte vulnérabilité, liés à la vulnérabilité environnementale. Il est donc nécessaire de prendre en compte très localement, et d'une manière précise, la vulnérabilité, notamment en raison de sa très forte variabilité spatiale. Cette évaluation de la vulnérabilité trouve son intérêt opérationnel avec la superposition de couches d'aléas préexistantes, pour une lecture plus fine et une gestion plus efficace des risques associés.

Ce travail de recherche, dont la finalité était de rendre plus efficace la gestion du risque pluvial en milieu urbain, a choisi comme entrée une approche de ce risque fondée sur la relation entre l'aléa et la vulnérabilité. Ce choix a principalement été motivé par des raisons d'applications opérationnelles. Cette analyse ne couvre donc pas tous les champs d'analyse des risques, mais cette étude est intégrable dans une approche pluridisciplinaire.

La valeur indicative des résultats obtenus et les choix méthodologiques retenus ont évidemment leurs limites. En premier lieu, bien que les mesures fournies par le réseau de mesure au sol soient sévèrement critiquées et validées, ces dernières sont entachées d'une erreur de mesure relative mais toujours présente et inévitable. En effet, nous avons exposé dans la première partie les multiples sources d'erreurs pouvant affecter cette mesure. Ces erreurs, liées au site, à la captation des précipitations, à la précision du capteur ou à des

facteurs externes, même minimes, viennent perturber les analyses qui les exploitent. Les données issues du réseau de mesure au sol ne sont pas les seules dont la qualité puisse être remise en cause. Il en est de même pour les données issues du radar météorologique. Nous avons vu que la donnée radar est le résultat d'une procédure extrêmement longue et d'une chaîne de traitement très complexe. Ainsi, malgré tout le soin apporté à la collecte des données et à leur fiabilisation, il est toujours possible que des problèmes d'échos fixes, de bandes brillantes ou d'atténuation de l'énergie du faisceau viennent entacher la mesure et ne soient pas détectés.

Dans un second temps, la durée des séries de données exploitées est une limite à la représentativité de l'étude. L'analyse de l'aléa pluvial par le réseau de mesure au sol repose sur une période allant de 1988 à 2005, soit 18 années. Cette période, sans être courte, gagnerait cependant à être allongée. Nous observons la même limite en ce qui concerne les données du radar météorologique, notamment pour les épisodes remarquablement intenses utilisés dans l'analyse descriptive de l'aléa. Les cinq épisodes les plus intenses de la période 2001-2005 ont été étudiés. Cette étude a permis d'analyser environ 2000 noyaux de pluie de forte intensité, ce qui constitue déjà un échantillon très considérable, et possède une réelle valeur indicative qu'il conviendra de conforter dans les études futures.

La base de données du Grand Lyon qui recense les débordements présente elle aussi des limites qui ont déjà été évoquées. En effet, cette base de données est constituée par les agents de terrain, mais il ne peut s'agir en aucun cas d'un recensement exhaustif. Les raisons sont multiples, comme lorsque les débordements sont trop nombreux pour être tous répertoriés, ou lorsque que ces derniers surviennent dans des zones peu densément peuplées et ne sont donc pas recensés. En outre, des erreurs peuvent être introduites lors du renseignement des fiches de terrain, comme la saisie erronée d'une date ou d'un emplacement. Ces limites sont associées aux simulations hydrologiques du réseau d'assainissement. On retiendra ici que seul le réseau structurant est modélisé, et que les simulations ont été réalisées avec un modèle datant de 2009, qui ne correspond donc pas à celui en utilisation dans les années 90 par exemple.

Enfin, la décomposition hiérarchique de l'analyse de la vulnérabilité vise au recensement exhaustif, mais certains des enjeux ou des facteurs de sensibilité n'ont pas encore été intégrés, en raison de temps et de moyens limités. Ainsi, nous avons vu que seule la population résidente avait été retenue, et que les facteurs de sensibilité des enjeux environnementaux et matériels n'avaient pour le moment pas été incorporés. De la même manière, la méthode de priorisation des enjeux, avec l'emploi de l'*AHP*, peut aussi être critiquée, bien que les raisons qui nous ont poussé à retenir cette méthode aient clairement

été justifiées. Ces limites temporaires ouvrent une partie des perspectives scientifiques de ce travail de thèse.

Comme nous venons de le souligner, la taille des échantillons utilisés lors de l'analyse descriptive des noyaux de pluies intenses constitue une limite à la représentativité de l'analyse. Une des perspectives des travaux futurs à réaliser est donc d'appliquer la même méthodologie à un échantillon plus étoffé : pour exemple utiliser un échantillon qui regrouperait les dix épisodes les plus intenses de la période 2001 à 2010, ou qui serait constitué d'un mois en particulier, ce qui viendrait conforter les premiers résultats.

Sur le plan de l'analyse de la vulnérabilité, une des perspectives à court terme est d'inclure dans l'étude les populations manquantes, comme celles au lieu de travail, en transit, ou dans les hôpitaux. Il est aussi envisagé de ventiler ces résultats en fonction de l'heure de la journée, ou du moins de réaliser des cartes de vulnérabilité diurne et nocturne, et de différencier les périodes de semaine de celles du week-end.

Pour continuer sur les pistes d'approfondissement de ce travail, l'amélioration de la connaissance de l'aléa nécessite de nombreuses études complémentaires. Ainsi, les résultats issus de l'analyse descriptive des noyaux de pluie de forte intensité pourraient être comparés aux sorties locales du modèle *Arome* de Météo-France (Ducrocq et al., 2004 et 2005 ; Bouttier, 2007 ; Vincendon et Carrière, 2009). Ce modèle, qui « regroupe les meilleurs composants des modèles Méso-NH Aladin, et de l'assimilation de données IFS/Arpège » (Bouttier, 2007), possède une haute résolution spatiale, de l'ordre du kilomètre, et a « l'objectif d'améliorer la prévision des phénomènes météorologiques de mésoéchelle comme les orages et les pluies intenses » (Ducrocq et al., 2005). Il s'agirait ainsi de comparer les observations issues du radar météorologique, traitées par la méthodologie mise en place à l'aide du SIG, aux sorties numériques du modèle le plus fin de Météo-France. Les résultats du radar traités par le SIG pourraient aussi être confrontés aux simulations conditionnelles du modèle à bande tournante du Cemagref de Lyon (Lepioufle, 2009 ; Braud et al., 2010). En outre, à l'heure actuelle, dans le cadre du projet européen *Prepared* (http://www.prepared-fp7.eu), la direction de l'eau du Grand Lyon en collaboration avec le LGCIE de l'INSA de Lyon et le LCRE de l'UMR 5600 CNRS EVS est en cours d'installation d'un radar météorologique à bande X, à Bron, dans l'est de l'agglomération lyonnaise. Cette installation constituera donc une source d'information complémentaire à confronter aux autres données.

Enfin, pour recouper l'ensemble des échelles d'analyse, il est envisagé de lier le travail déjà effectué à l'échelle locale avec les schémas de dynamique générale à l'échelle synoptique (Comby, 1998 ; Vigneau, 1986 et 2005, par exemple). Il est ainsi prévu de mettre en parallèle les caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité avec les types de situation météorologique, en s'appuyant par exemple sur une méthode du type de celle de la classification européenne de Hess-Brezowsky (Douvinet et al., 2009 ; Rome et al., 2009), et d'affiner les relations potentielles entre la pluviométrie et les effets locaux, tel que l'îlot de chaleur urbain et les reliefs par exemple.

Références bibliographiques

Achour-Bouakkaz N. et Abdou S., 2008 - La relation entre l'îlot de chaleur urbain et la densité du bâti : cas de la ville d'Alger. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 21, pp. 57-64

Agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise, 2005 - Risques technologiques et vulnérabilités dans l'agglomération lyonnaise. Document Agence d'urbanisme, Lyon, 48 p.

Al Khalil M. I., 2002 - Selecting the appropriate project delivery method using AHP. International Journal of Project Management, vol. 20, n°6, p. 469-474

Al-Harbi K. M. A.-S., 2001 - Application of the AHP in project management. International Journal of Project Management, vol. 19, n°1, pp. 19 -27

Allard D., 2003 - Geostatistical classification and class kriging. Proceedings of SIC 1997 in Ispra, Italy, pp. 163-175

Anagnostou M., Kalogiros J., Anagnostou E., Papadopoulos A., 2009 - Experimental results on rainfall estimation in complex terrain with a mobile X-band polarimetric weather radar. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 4, pp. 579-595

Andrieu H., 2002 - La mesure de pluie par radar : du calibrage par des pluviomètres vers l'inteprétation physique des images. La Houille Blanche, n°2, pp. 32-36

Andrieu H., Browne O. et Laplace D., 2004 - Les crues en zones urbaines : des crues éclairs ? La Houille Blanche, n°2, pp. 89-95

Anquetin S., 2003 - Contribution à l'étude des processus atmosphériques de méso-échelle en zone de relief marqué. Mémoire de recherche d'Habilitation à Diriger les Recherches. LTHE – CNRS UMR 5564, 254 pp.

Arnaud M. et Emery X., 2000 - Estimation et interpolation spatiale. Hermes Science Publications, Paris, 221 p.

Astrade L., Lutoff C., Nedjai R., Phillipe C., Loison D. et Bottolier-Depois S., 2007 - Péri-urbanisation et risques naturels. Revue de géographie alpine, vol. 95, pp. 9-28

Atkinson P. M. et Lloyd C. D., 2003 - Mapping precipitation in Switzerland with ordinary and indicator kriging. Proceedings of SIC 1997 in Ispra, Italy, pp. 151-162

Aubry P. et Piégay H., 2001 - Pratique de l'analyse de l'autocorrélation spatiale en géomorphologie : définitions opératoires et tests. Géographie physique et Quaternaire, vol. 55, n°2, 20 p.

Austin P. et Houze R., 1972 - Analysis of the structure of precipitation patterns in New-England. Applied Meteorology, n°24, pp. 926-935

Baillargeon, S., 2005 - Le krigeage : revue de la théorie et application à l'interpolation spatiale de données de précipitations. Mémoire présenté de maîtrise en statistiques, Faculté des sciences et de génie - Université Laval Québec, 102 p.

Ball J. et Luk K., 1998 - Modelling Spatial Variability of Rainfall over a Catchment. Journal of Hydrologic Engineering, Volume 3, Issue 2, April 1998, pp. 122-130

Bana e Costa C. A., De Corte J.-M. et Vansnick J.-C., 2003 - MACBETH. in Multiple Criteria Decision Analysis : The State of the Art Surveys by J. Figueira, S. Greco et M. Ehrgott, Springer Verlag, Boston, Dordrecht, London, p. 409-442

Banerjee S., Carlin B. et Gelfand A., 2004 - Hierarchical Modeling and Analysis for Spatial Data. Chapman and Hall Ltd., New-York, 257 p.

Barczak A. et Grivault C., 2007 - Système d'information géographique pour l'évaluation de la vulnérabilité au risque de ruissellement urbain. Actes de la conférence internationale Novatech 2007, Lyon, pp. 139-147

Barroca B. et Hubert G., 2008 - Urbaniser les zones inondables, est-ce concevable ?. Développement durabe, dossier 11 catastrophes et territoires, 21 p.

Barroca B., Bernardara P., Mouchel J. M. et Hubert G., 2006 - Indicators for identification of urban flooding vulnerability. Natural Hazards and earth system sciences, n°6, pp. 553-561

Barroca B., Pottier N. et Lefort E., 2005 - Analyse et évaluation de la vulnérabilité aux inondations du bassin de l'orge aval. Actes des septièmes rencontres de ThéoQuant, Besançon, 12 p.

Barroca B., Serre D., Diab Y. Piel C. et Porteneuve C., 2010 - Comment la forme urbaine peut-elle compléter le réseau d'assainissement pluvial ? De la maîtrise des écoulements lors des événements exceptionnels à la gestion des pollutions. Actes de la conférence Novatech, 2010, 7ème conférence internationale, Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, 6 p.

Becchi I., 1970 - On the possibility to improve the measurement of rainfall: the control of tippingbucket rain gauges. Technical Report for CNR Grant. University of Genova, n° 69.01919, 11 pp.

Beck E., 2006 - Approche multirisque en milieu urbain. Le cas des risques sismiques et technologiques dans l'agglomération de Mulhouse (Haut-Rhin). Thèse de doctorat de géographie, Université Louis Pasteur Strasbourg 1, 246 p.

Beck E., Weber C. et Granet M., 2006 - Etude multirisque en milieu urbain et SIG. Revue internationale de géomatique, vol. 16 - n°3/4, pp. 395 - 414

Beltrando G. et Dahech S., 2005 - L'intensité de l'îlot de chaleur urbain à Sfax : apport de l'imagerie spatiale et des mesures itinérantes. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 18, pp. 121-125

Ben Mena S., 2000 - Introduction aux méthodes multicritères d'aide à la décision. Biotechnologie, Agronomie, Société et Environnement, n° 4, p. 83-93

Bengtsson L. et Hodges K., 2006 - Storm tracks and climate change. Journal of climate, vol. 19, pp. 3518-3543

Béral-Guyonnet I., 1994 - Analyse des précipitations, des températures, et de l'amplitude thermique sur l'agglomération de Lyon. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 7, pp. 389-398

Béral-Guyonnet I., 1994 - Analyse des précipitations, des températures, et de l'amplitude thermique sur l'agglomération de Lyon. Actes de l'association internationale de climatologie, AIC, pp 389-398

Béral-Guyonnet I., 1997 - Le climat et la pollution atmosphérique de l'agglomération lyonnaise. Thèse de doctorat, Université Jean Moulin Lyon III, 490 p.

Berdon N., 2009 - The analyses of thunderstorm on 4 august 2006. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 111-117

Berthelot M., 2008 - Climat régional, climat local et pollution de l'air l'ozone dans les régions de Tours et d'Orléans. Thèse d'aménagement de l'Université de Tours, UMR 6173, 294 p.

Bertrand-Krajewski J.L. et Joannis C., 2009 - Validation et critique des résultats de mesure en hydrologie urbaine. La Houille Blanche, n°3, pp. 60-67

Beucher S., 2007 - Le risque d'inondation dans le Val-de-Marne : une territorialisation impossible ? Annales de Géographie, vol. 5, pp. 470-492

Bigot S., Planchon O., Rome S. et Lebel T., 2007 - Variations climatiques et circulation atmosphérique européenne dans le massif du Vercors (1921-2006). Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 20, pp. 111-116

Blanchet G. et Suchel J.-B., 2004 - L'impact pluviométrique des divers types de régimes perturbés le long du couloir Saône-Rhône. Climatologie, vol. 1, pp. 65-84

Blanchet P., Paquiet P, Zampa C., 1996 - Industries chimiques et territoire : contraintes et opportunités de développement. Revue de Géographie de Lyon, vol. 71, n°1, pp. 23-30

Bonnet E., 2002 - Risques industriels : évaluation des vulnérabilités territoriales. Thèse de doctorat de géographie, Université du Havre, 341 p.

Bouchon S., 2006 - L'application du concept du vulnérabilité aux infrastructures critiques : quelles implications pour la gestion territoriale des risques ?. Responsabilité et environnement, n °43, pp. 35-40

Boudevillain B., 2007 - Impact de la qualité de mesure sur les produits et études climatologiques. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2 , pp. 26-27

Boulanger P.-M., 2004 - Les indicateurs de développement durable : un défi scientifique, un enjeu démocratique. Les séminaires de l'Iddri, n°12 , Paris, avril 2004, p. 24.

Bourgogne P., Briat P., Andréa G et Anselme C., 2007 - Prévention des inondations urbaines et limitation des rejets temps de pluie. Vers la mise en œuvre d'une gestion dynamique sur le bassin versant Louis Fargue à Bordeaux. Actes de la conférence internationale Novatech 2007, Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, pp. 777-784

Bourrelier P.-H., 2006 - Introduction du n° 43 de R esponsabilité et environnement. Responsabilité et environnement, n°43 / 2, pp. 7-8

Bouttier F., 2007 - Arome, avenir de la prévision régionale. La Météorologie, n°58, pp. 12-20

Bouvier C., Ayabaca E., Perrin J. L., Cruz F., Fourcade B. Rosario S., Carrera L., 1999 - Variabilités temporelles et spatiales des averses en mililieu andin : exemple de la ville de Quito (Equateur). Revue de géographie alpine, vol. 87, pp. 51-65

Brady, P. J., Schroeder M. et Poellot M., 1978 - Automatic identification and tracking of radar echoes in HIPLEX. Preprints, 18th Conf. on Radar Meteorology, Atlanta, GA, Amer. Meteor. Soc., pp. 139–143

Braud I., Chancibault K., Debionne S., Lipeme Kouyi G., Sarrazin B., Jacqueminet C., Andrieu H., Béal D., Bocher E., Boutaghane H., Branger F., Breil P., Chocat B., Comby J., Dehotin J., Dramais G., Furusho C., Gagnage M., Gonzalez-Sosa E., Grosprêtre L., Honegger A., Jankowfsky S., Joliveau T., Kermadi S., Lagouy M., Leblois E., Martin J.Y., Mazagol P.O., Michell K., Molines N., Mosini M.L., Puech C., Renard F., Rodriguez F., Schmitt L., Thollet F., Viallet P., 2010 - The AVuPUR project (Assessing the Vulnerabiliy of Peri-Urbans Rivers) : experimental set up, modelling strategy and first results. Actes de

Novatech 2010 – 7ème conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, Lyon, juin 2010, 9 p.

Brémaud P. et Pointin Y., 1993 - Forecasting heavy rainfall from rain cell motion using radar data. Journal of Hydrology, n°142, pp. 373-389

Bruchon Q. et Planchet L., 2010 - Couplage de données radar et de données pluviométriques au sol - évaluation des performances en terme hydrologique. Projet d'Initiation à la Recherche & Développement, 49 p.

Brunner N. et Starkl M., 2004 - Decision aid systems for evaluating sustainability: a critical survey. Environmental Impact Assessment Review, n° 24 / 4, p. 441-469

Bryan B. et Adams J., 2002 - Three-dimensional neurointerpolation of annual mean precipitation and temperature surfaces for china. Geographical Analysis, vol. 34, n°3, pp. 94-111

Cadet D. et Guillot B., 1991 - Estimation des pluies par satellite. Orstom éditeur, 63 pp.

Calvet M. et Lemartinel B., 2002 - Précipitations exceptionnelles et crues éclairs dans l'aire pyrénéo-méditerranéenne. Géomorphologie, vol. 1, pp. 35-50

Camp'Huis N.-G. et Devaux-Ros C., 2006 - Le diagnostic de vulnérabilité à l'inondation: un outil de prévention efficace. Responsabilité et environnement, n° 43, pp. 41-46

Cantat O., 2004 - L'îlot de chaleur parisien selon les types de temps. Norois, n° 191, vol.2, pp. 75-102

Caradot N., 2005 - L'évaluation de la qualité de service rendu par le système d'assainissement au cœur de la gestion durable des eaux urbaines : le cas du Grand Lyon. Mémoire de Master recherche SEIU du LGCIE, INSA de Lyon, 65 p.

Caradot N., Granger D., Rostaing C., Cherqui F., Chocat B., 2010a - L'évaluation du risque de débordement des systèmes de gestion des eaux urbaines : contribution méthodologique de deux cas d'études (Lyon et Mulhouse). Actes de la conférence Novatech, 2010, 7ème conférence internationale, techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, 10 p.

Caradot N., Granger D., Rostaing C., Cherqui F., Chocat B., 2010b - L'évaluation du risque de débordements des systèmes de gestion des eaux urbaines. Techniques, sciences, méthodes, n°6, pp. 58-67

Cardona O., 2003 - The need for rethinking the concepts of vulnerability and risks from an holistic perspective: a necessary review and criticism for effective risk management", in

Bankoff G., Frerks G., Hilhorst D. (ed.). Mapping vulnerability: disasters, development and people, London, Earthscan Publishers, 23 p.

Bethemont J., Danière C., Vanier M., 1997 - Rhônes-Alpes, l'axe et le carrefour. Mappemonde, vol. 4, pp. 14 – 19

Carré C., 2006 - Les évolutions en France dans la théorie et les pratiques d'une gestion territoriale du risque : l'application au cas des inondations. Annales de géographie, n° 648, pp. 133-153

Carré C., 2002a - L'intégration des eaux pluviales en milieu urbain dense. Etudes foncières, n° 96, pp. 30-35

Carré C., 2002b - Temps et systèmes spatiaux : l'assainissement dans l'agglomération parisienne. L'Espace géographique, n° 3, pp. 227-24 0

Carré C., Barraud S., Desbordes M., Deutsch J.-C., Guillon A., Laplace D., Roux C. et Kovacs Y., 2010 - Quelle maîtrise publique des eaux pluviales urbaines en France. Techniques Sciences Méthodes, n° 6, pp. 19-26

Carrega P., 2004 - Avant-propos sur les types de temps. Norois, n° 191, vol.2, pp. 7-9

Carrega P. et Rosa F., 2005 - Aspect du climat urbain de Nice : îlot de chaleur, îlot de fraîcheur, effets de paroi. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 18, pp. 35-39

Caviglia G., 2003 - Bilan des inondations de décembre 2003 et état d'avancement des actions engagées. Note interne de la direction de l'eau, Grand Lyon, 5 p.

CERTU, 2003 - La ville et son assainissement. Principes, méthodes et outils pour une meilleure intégration dans le cycle de l'eau. Édition du Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques, Paris, 505 p.

Champeaux J. L., Dupuy P., Laurantin O., Soulan I., Tabary P et Soubeyroux J. M., 2009 - Les mesures de précipitations et l'estimation des lames d'eau à Météo-France : état de l'art et perspectives. La Houille Blanche, vol. 5, pp. 28-34

Chancibault K., 2002 - Etudes numériques des orages supercellulaires en France. Thèse de l'Université de Toulouse III, Physique de l'atmosphère, 163 p.

Chang E., Lee S. et Swanson K., 2002 - Storm track dynamics. Journal of climate, vol. 15, pp. 2163-2183

Chardon A.-C., 1994 - Étude intégrée de la vulnérabilité de la ville de Manizales (Colombie) aux risques naturels. Revue de Géographie Alpine, vol. LXXXII, n° 4, pp. 97-111

Chenais L. et Dorigot M., 2009 - Couplage de données radar et de données pluviométriques au sol. Projet d'Initiation à la Recherche & Développement, 39934, 33 p.

Cherqui F., 2005 - Méthodologie d'évaluation d'un projet d'aménagement durable d'un quartier. Méthode Adequa. Thèse de doctorat de génie civil, Université de La Rochelle, 202p.

Chesneau E., 2009 - Un processus automatique d'amélioration des contrastes colorés sur les cartes de risques. Mappemonde, vol. 96, n°4, 14 p.

Chesneau E., 2006 - Modèle d'amélioration automatique des contrastes de couleur en cartographie : application aux cartes de risque. Thèse de doctorat de l'Université Paris-Est Marne-la-vallée, institut géographique national, 372 p.

Chèze J. L., 2002 - Le réseau Aramis et ses utilisations quantitatives et qualitatives. La Houille Blanche, n°6, pp. 86-92

Chèze J. L., Champeaux J. L. et Tabary P., 2010 - Réseau et produits radar : situation actuelle et perspective. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, pp. 2-4

Chocat B., 1997a - Encyclopédie de l'hydrologie urbaine et de l'assainissement. Lavoisier, Tech & Doc, Paris, 1124 p.

Chocat B., 1997b - Le rôle possible de l'urbanisation dans l'aggravation du risque inondation: l'exemple de l'Yzeron (Lyon). Revue de géographie de Lyon, vol. 72 - 4, pp. 273- 280

Chocat B., 2002 - Proposition pour l'élaboration d'un programme de recherche à moyen terme sur le risque d'inondation par ruissellement urbain. Application au cas de l'agglomération lyonnaise. , document interne et provisoire à l'OTHU, 4 p.

Chocat B. et Bardin J.P., 2002 - Mise en place de l'autosurveillance : Modélisation générale du réseau d'assainissement Grand Lyon. Définition d'entrées pluvieuses standardisées. Rapport final URGC-HU, INSA de Lyon, 28 p.

Chocat B. et Bardin J.P., 2007 - Elaboration d'entrées pluvieuses simplifiées pour le diagnostic ou le dimensionnement d'ouvrages d'assainissement sur le territoire du Grand Lyon. Document interne à la Direction de l'eau, LGCIE-HU, INSA de Lyon, 63 p.

Chocat B., Ashley R., Marsalek J., Matos R., Rauch W., Schilling W. et Urbonas B., 2007 - Toward Sustainable Management of Urban Storm Water. Indoor and Built Environment, vol. 16, n°3, pp. 273-285

Chocat B., Dorval F. et Renard F., 2010 - Calibration des données radar à partir de mesures au sol en hydrologie urbaine : approche statistique. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, pp. 7-9

Chvila B. et Sevruk B., 2006 - Effect of small intensity precipitation on wind induced error of precipitation measurment. Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2006, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 7, pp. 8-12

Cleveland W. et Devlin S., 1988 - Locally weighted regression : An approach to regression analysis by local fitting. Journal of the American Statistical Association, n°83 (403), pp. 596-610

Coanus T., 2010 - Risques et territoires : food for thought. Conclusion générale de l'ouvrage Risques et territoires : interroger et comprendre la dimension locale de quelques risques contemporains, dirigé par Coanus T., Comby J., Duchêne F. et Martinais E., pp. 427-443

Coanus T. et Comby J., 2002 - Axe transversal risques et territoires, UMR 5600 CNRS Environnement, Ville, Société. Risque et développement durable, éléments pour une programmation scientifique, document interne à l'UMR 5600, pp. 22

Coanus T. et Comby J., 2005 - Axe transversal risques et territoires, UMR 5600 CNRS Environnement, Ville, Société. Eléments de projet 2007-2010, document interne à l'UMR 5600, 19 p.

Coanus T. et Comby J., 2008 - Axe transversal risques et territoires, UMR 5600 CNRS Environnement, Ville, Société. Demande de soutien financier 2008-2010, document interne à l'UMR 5600, 4 p.

Combe C., 2007 - La ville endormie ? Le risque d'inondation à Lyon. Approche géohistorique et systémique du risque de crue en milieu urbain et périurbain. Thèse de doctorat de géographie, aménagement et urbanisme, Université Lumière Lyon 2, 467 p.

Comby J., 1998 - Les paroxysmes pluviométriques dans le couloir Rhodanien. Thèse de géographie et aménagement, Université Jean Moulin Lyon III, 668 p.

Comby J., 2004a - Mise en carte et risques de dérives technocratiques dans la prévention des risques. in Veyret Y. et al., Risques naturels et aménagement en Europe, Paris, Armand-Colin, pp. 79-85

Comby J., 2004b - De la climatologie aux pratiques de l'aménagement du territoire : le risque comme champ d'exploration scientifique. HDR de l'Université Jean Moulin Lyon3, UMR 5600 CNRS, vol. 1, 227 p.

Comby J., 2010 - Les problèmes d'échelles dans l'évaluation de la distribution spatiale et temporelle des précipitations de fortes intensités. Chapitre de l'ouvrage Risques et territoires : interroger et comprendre la dimension locale de quelques risques contemporains, dirigé par Coanus T., Comby J., Duchêne F. et Martinais E., pp. 299-311

Comby J. et Rueneuve S., 2004 - Caractérisation des événements pluvieux dits "à risque" dans l'agglomération lyonnaise. Actes de l'association internationale de climatologie, Caen, pp. 139-142

Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, 2007 - Commentaire et discussions suite à la séance 2. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, p. 28

Cressie, N., 1993 - Statistics for spatial dataWiley series in probability and mathematical statistics : applied probability and statistic. John Wiley and sons Inc. New-York, 212 p.

Creutin J.D., Borga M., Lutoff C., Scolobig A., Ruin I., et Créton-Cazanave L., 2009 - Catchment dynamics and social response during flash floods: the potential of radar rainfall monitoring for warning procedures. Meteorological Applications, vol. 16, pp. 115-125

Cummings R., Upton G., Holt A et Kitchen M., 2008 - Using microwave links to adjust the radar rainfall field. Advances in water ressources, vol. 32/7, pp. 1003-1010

Dauphiné A., 2003 - Risques et catastrophes - Observer, spatialiser, comprendre, gérer. Collection Universitaire Armand Colin, Paris, 288 p.

Deblaère J.-C. et Fabry M.-H., 1998 - Inventaire des situations à précipitations remarquables en Auvergne, Bourgogne et Rhône-Alpes. Météo-France, phénomènes remarquables, n°5, 102 p.

Dechemi N., 2000 - Contribution à l'analyse du régime pluviométrique sur le littoral algérien. Sécheresse, vol. 11, pp. 5-10

Degiorgis M., 2006 - Studio della vulnerabilità a differente scala spaziale di evento per fenomeni di inondazione con scopi assicurativi. Thèse de l'università di Genova, 136 p.

del Carmen Llasat M., 2004 - La vulnérabilité en Catalogne et la perception sociale. La Houille Blanche, vol. 6, pp. 71-75

Delahaye E., 2004 - La dialectique des villes et du Rhône à l'aval de Lyon : des villes malgré le fleuve ? Urbanisation et contraintes fluviales. Géocarrefour, vol. 79/1, pp. 85-93

Delahaye F., Dubreuil V. et Machado L., 2010 - Analyse géostatistique des précipitations mensuelles en amazonie bésilienne. Actes de l'association internationale de climatologie, 23ème colloque, Rennes, pp. 167-172

Delrieu G., 2003 - L'Observatoire Hydro-météorologique Méditerranéen Cévennes-Vivarais. La Houille Blanche, n°6, pp. 83-88

Delrieu G. et Pellarin T., 2002 - La mesure de pluie par radar : "visibilité hydrologique en région montagneuse". La Houille Blanche, n°2, pp. 4 2-45

Delrieu G., Boudevillain, B., Nicol J., Chapon B., Kirstetter P.-E., Andrieu H., et Faure D., 2009 - Bollène 2002 experiment: radar rainfall estimation in the Cevennes-Vivarais region. Journal of Applied Meteorology and Climatology, vol. 48, pp. 1422-1447

Delrieu G., Creutin J.D., Andrieu H., 1995 - Simulation of X-band weather radar mountain returns using a digitized terrain model. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 12, pp. 1038-1049

Delrieu G., Kirstetter P.E., Boudevillain B., 2006 - Vers un modèle d'erreur pour la mesure des pluies par radar météorologique en région Cévennes-Vivarais. La Houille Blanche, n°6, pp. 27-32

Delrieu G., Kirstetter P.E., Nicol J. et Neppel L., 2004 - L'événement pluvieux des 8-9 septembre 2002 dans le Gard : Estimation des précipitations par radars et pluviomètres. La Houille Blanche, n°6, pp. 93-98

Demoares F. et D'Ercole R., 2009 - Risques et accessibilité des lieux dans le district métropolitain de Quito (Equateur). Mappemonde, n°3, 8 p.

D'Ercole R., 1994 - La vulnérabilité des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typlologie, mode d'analyse. Géographie alpine, n°4 spécial « Croissance urbaine et risques naturels dans les montagnes de pays en voie de développement », p 87-96

D'Ercole R. et Pigeon P., 2003 - "L'expertise internationale des risques dits naturels : Intérêts géographiques. Annales de géographie, vol. 108, pp.339-357

D'Ercole R., Thouret J.-C., 1996 - Vulnérabilité aux risques naturels en milieu urbain : effets, facteurs et réponses sociales. Cahier des sciences humaines, vol. 96, n°2, pp. 407-422

D'Ercole R., Thouret J.C., Dollfus O., Aste J.P., 1994 - Les vulnérabilités des sociétés et des espaces urbanisés : concepts, typologie, modes d'analyse. Revue de Géographie Alpine, vol.82 - n°4, pp. 87-96

Desbordes M., 1987 - Contribution à l'analyse et à la modélisation des mécanismes hydrologiques en milieu urbain. Thèse d'état, université de Montpellier, 242 p.

Deshons P., 2002 - Prévision et suivi des crues urbaines : expérience de la ville de Marseille. La Houille Blanche, vol. 2, p. 56-59

Dimitrov C. et Pin X., 2006 - Les outils de l'action publique face aux aléas. La Houille Blanche, n°6, pp. 48-56

Direction de l'eau du Grand Lyon, 2005 - Le réseau de pluviomètres de la communauté urbaine de Lyon. Document interne à la Direction de l'eau, 2ème édition, 22 pp.

Direction de l'eau du Grand Lyon, 2009 - Approche globale sur le Grand Lyon de l'évaluation des rejets au milieu naturel. Document interne à la Direction de l'eau, Service études, 11 p.

Dixon M. et Wiener G., 1993 - Titan : thunderstorm identification, tracking, analysis and nowcasting - a radar based methdology. J. Atmos. Oceanic Technol., n°10, pp. 785-797

Dodd F.J., Donegan H.A., 1989 - The representation and combination of opinions. Proceedings of ILIAM 6, University of Ulster, pp. 17-29

Dodd F.J., Donegan H.A., Mc Master T.B.M., 1995 - Reassessment of consistency criteria in judgement matrices. The Statistician, 44, n°1, pp. 31-41

Donze J., 2005 - Les bassins du risque industriel : l'exemple de la vallée du Rhône. Géoconfluences, Actes des cafés géographiques de décembre 2003, 15 p.

Donze J., 2007 - Editorial : Le risque. De la recherche à la gestion territorialisée. Géocarrefour, vol. 82, pp. 3-6

Douguedroit A., 2004 - Quelle "exception française" en matière de "type de temps" . Norois, n°191, vol.2, pp. 33-39

Douguedroit A., 2008 - Précipitations extrêmes et crues urbaines à Marseille (France) de 1861 à 2007. Bulletin de la société géographique de Liège, n°51, pp. 105-114

Douguedroit A., 2010 - Précipitations extrêmes et crues en ville méditerranéenne : deux cas à Marseille et à Alger. Actes de l'association internationale de climatologie, 23ème colloque, Rennes, pp. 185-190

Douvinet J., 2008 - Les bassins versants sensibles aux crues rapides dans le bassin parisien - analyse de la structure et de la dynamique de systèmes spatiaux complexes. Thèse de doctorat de géographie - aménagement, Université de Caen - Basse Normandie, 393 p.

Douvinet J., Planchon O., Cantat O., Delahaye D., Cador J.-M., 2009 - Variabilité spatio-temporelle des pluies de forte intensité à l'origine des "crues rapides" dans le bassin parisien (France). Climatologie, vol. 6, pp. 47 - 72

Douvinet J., Planchon O., Cantat O., Delahaye D., Cador J.-M., 2008 - Episodes pluvieux et types de circulations atmosphériques à l'origine des « crues rapides » dans le nord de la France (bassin parisien). Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 21, pp. 207-214

Drapeau L., 2000 - Statistiques et Interpolations dans les SIG. Centre I.R.D, Laboratoire HEA, Montpellier, 7 p.

Druot C., 2003 - Analyse pluviométrique des seuils de vulnérabilité sur l'agglomération lyonnaise face aux risques de ruissellement et d'inondation. Mémoire de maîtrise d'aménagement, Université Jean Moulin Lyon III, , 90 pp.

Dubreuil V., Jallet A., J. Ronchail et Maitelli G., 2004 - Estimation des précipitations par télédétection au Mato Grosso (Brésil). Climatologie, vol. 1, pp. 133-156

Duchon C. et Biddle C., 2010 - Undercatch of tipping-bucket gauges in high rain rate events. Advances in Geosciences, vol. 25, pp. 11-15

Ducrocq V., Bouttier F., Malardel S., Montmerle T. et Seity Y., 2005 - Le projet Arome. La Houille Blanche, n°2, pp. 39-43

Ducrocq V., Lebeaupin C., Thouvenin T., Giodani H., Chancibault K., Anquetin S. et Saulnier G. M., 2004 - L'événement des 8-9 septembre 2002 : situation météorologique et simulation à mésoéchelle. La Houille Blanche, n°6, pp. 86-92

Dumolard P., Dubus N. et Charleux L., 2003 - Les statistiques en géographie. Edition Belin, Paris, 239 p.

Dyer J., 1990 - Remarks on the analytical hierarchy process. Management Science, vol. 3, p. 249-258

Einfalt T., 2001 - La valeur pluviométrique mesurée : une valeur douteuse. La Houille Blanche, n°5, pp. 52-57

Einfalt T., Arnbjerg-Nielsen K.et Spies S, 2000 - Rainfall data measurment and processing for model use in urban hydrology. Proceedings of the 5th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2000, Pontresina Switzerland, vol. 5, pp. 24-28

Einfalt T., Gerlach N., Podlasky C. et Demuth N., 2008 - Rainfall and climate data quality control. Proceedings of the 11th intenational conference on urban drainage, Edinburgh, Scotland, UK, vol. 11, pp. 1-8

Einfalt T., Jessen M. et Quirmach, 2006 - Can we check raingauge data automatically. Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2006, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 7, pp. 13-17

Emmanuel I., Andrieu H. et Tabary P., 2009 - Evaluation of the new operational French radar product for urban hydrology. Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2009, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 8, pp. 37-41

Emmanuel I., Romano G., Cardinal H., Lepelletier T. et Andrieu H., 2010 - Influence des bassins de rétention sur les débits du bassin versant amont de la Bièvre et intérêt de la mesure radar pour sa modélisation hydrologique . Actes de la conférence Novatech, 2010, 7ème conférence internationale, Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, 6 p.

Expert Choice, Inc., 2000 - Expert Choice 2000. Quick Start Guide and Tutorials. . Advanced Decision Support Software, USA, Pittsburgh, 157 p.

Faure D., 2008 - Analyse de la qualité de mesure hydrologique des radars météorologiques de St Nizier et Lyon Satolas. Application au Grand Lyon.. Rapport ALICIME, RE08061, 46 p.

Faure D., 1993 - Application à l'hydrologie du radar météorologique : comparaisons d'estimation radar et pluviomètriques pour des lames d'eau horaires sur de petits bassins cévenols. Thèse de l'université Joseph Fourier Grenoble I,, thèse préparée au sein du LCPC de Nantes, 260 p.

Faure D., 2005 - Cartographie globale de la visibilité hydrologique du réseau radar métropolitain ARAMIS à l'horizon 2006 : Extension à l'ensemble du territoire métropolitain pour le mode d'exploitation passé et actuel des radars. Rapport ALICIME, RE05002b, 47 p.

Faure D. et Auchet P., 2002 - Le développement de l'utilisation des informations radar à Nancy : un exemple de dialogue continu entre chercheurs, développeurs et utilisateurs. La Houille Blanche, n°2, pp. 29-36

Faure D., Andrieu H. et Creutin J., 1997 - Comparaison d'estimations radar et pluviométriques de pluies horaires sur de petits bassins versants cévenols. La Houille Blanche, n°1/2, pp. 19-34

Faure D., Payrastre O. et Auchet P., 2005a - Gestion d'un réseau d'assainissement à l'aide d'un système d'alerte basé sur des données de radar météorologique : retour d'expérience après plusieurs années d'utilisation. Annales du bâtiment et des travaux publics, n°3, pp. 12-24

Faure D., Delrieu G., Tabary P., Parent du Chatelet J. et Guimera M., 2005b - Application of the hydrologic visibility concept to estimate rainfall measurment quality of two planned weather radar. Atmospheric Research, vol. 77, issues 1-4, pp. 232-246

Forsyth, D. E., 1979 - Real time forecasting of echo–centroid motion. M.S. thesis, Dept. of Meteorology, University of Oklahoma, 79p.

Fotheringham A., Brunsdon C. et Charlton M., 2002 - Geographically Weighted Regression : the analysis of spatially varying relationships. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 231 p.

Fustier B., 1994 - Prise de décision sur des critères qualitatifs. Note de recherche n°18, Centre d'Economie et de Modélisation Appliquées, Université de Corse, 16 p.

Gaber J., 2004 - La prévention du risque d'inondation par ruissellement pluvial en France. Publication de la Société Hydrotechnique de France, Crues méditerranéennes, vulnérabilité, aléa, prévisions et gestion de crise, Colloque d'hydrotechnique, 176ème session du Comité Scientifique et Technique, pp. 119-126

Gallet C., 2008 - Des grêlons, des bouchons et des inondations. Le Progrès, 39641, p.7

Gandin L., 1963 - Objective analysis of meteorological fields. Gidrometeorologicheskoe Izdatel'stvo (GIMIZ), Leningrad, 441 p.

Gaudart M., Karson M., Linder M. et Sinha D., 1999 - Bayesian spatial prediction. Environmental and Ecological Statistics, n°6, pp. 1 47-171

Genton M. et Furrer R., 2003 - Analysis of rainfall data by simple good sense: is spatial statistics worth the trouble ?. Proceedings of SIC 1997 in Ispra, Italy, pp. 45-50

Gilbert C., 2003 - Limites et ambiguïtés de la territorialisation des risques . Pouvoirs locaux, n°56, pp. 48-52

Gilbert C., 2006 - L'expertise et la science. Actes du colloque de l'atelier RDT du 19 mai 2006, Introduction de la troisième session, pp. 61-63

Glass B., 2004 - Evolution temporelle de la vulnérabilité aux crues en régions méditerranéennes. La Houille Blanche, vol. 6, pp. 62-70

Glatron S. et Beck E., 2010 - Information préventive et représentations des risques industriels par les Mulhousiens. Mappemonde, n°97, 6 p.

Gleyze J.F et Reghezza M., 2007 - La vulnérabilité structurelle comme outil de compréhension des mécanismes d'endommagement. Géocarrefour, vol. 82, pp. 17-25

Godfroid S., 2004 - Exposé de synthèse sur le thème « vulnérabilité ». La Houille Blanche, vol. 6, pp. 83-85

Goodison B., Louie P et Yang D., 1998 - WMO solid precipitation measurment intercomparison. WMO, Genève, TD n°872, 88 pp. + 21 2pp.

Goovaerts P., 1997 - Geostatistics for Natural Ressources Evaluation. Applied Geostatistics Series, Oxford University Press,, New-York

Goubersville P. et Laborde J.-P., 2005 - Incertitudes et interrogations dans l'évaluation de l'aléa en milieu urbain, mesures, concepts et modèles. La Houille Blanche, n°1, pp. 60-64

Graillot D., Londiche H., Dechomets R., Batton-Hubert M., 2001 - Analyse multicritère spatiale pour l'identification de la vulnérabilité aux inondations. In : Actes du colloque SIRNAT 2001, 6-7 décembre 2001, Sophia Antipolis, 11 p.

Grand Lyon, 2004 - Cahier Risques majeurs du Référentiel environnemental du Grand Lyon. Document Communauté urbaine de Lyon, Lyon, 27 p.

Granger D., 2009 - Méthodologie d'aide à la gestion durable des eaux urbaines. Thèse de doctorat de l'Institut National des Sciences Appliquées de Lyon (INSA), Laboratoire LGCIE, 210 p.

Granger D., Caradot N., Cherqui F. et Chocat B., 2010 - Comment gérer durablement un système de gestion des eaux urbaines ? Actes de la conférence Novatech, 2010, 7ème conférence internationale, Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, 6 p.

Gratton Y., 2002 - Le krigeage, la méthode optimale d'interpolation spatiale. Les articles de l'institut d'analyse géographique, n°6, 4 p.

Griot C., 2003 - Vulnérabilité et risques liés au transport de matières dangereuses. Doctorat de géographie, Université Paul Valéry, Montpellier III, 584 p.

Griot C., 2007a - Vulnérabilité et transports de matières dangereuses : une méthode d'aide à la décision issue de l'expertise de la sécurité civile. Cybergeo : European Journal of Geography, document 361, 33 p.

Griot C., 2007b - Des territoires vulnérables face au transport de matières dangereuses. Proposition d'un outil d'aide à la gestion de crise. Géocarrefour, vol. 82, pp. 51-63

Griot C. et Ayral P.-A., 2001 - Terminologie en sciences du risque. document préparatoire au colloque International Symposium, Dire le Risque : "le risque en examen", Mèze, France, 18-20 mai, 87 p.

Guillon A., Lovera M. et Senechal C., 2008 - Les ouvrages de gestion des eaux pluviales à la parcelle en France. Techniques, sciences, méthodes, n°12, pp. 69 - 78

Hajkowicz S. et Prato T., 1998 - Multiple Objective Decision Analysis of Farming Systems in Goodwater Creek Watershed, Missouri. Research Report No. 24. Columbia, University of Missouri-Columbia, 21 p.

Handwerker J., 2002 - Cell tracking with TRACE3D—a new algorithm. Atmospheric Research, n°61, pp. 15-34

Harker T. et Vargas L., 1990 - Reply to "remarks on the analytic hierarchy process" by J. S. Dyer. Management Science, vol. 3, p. 269-278

Harker T. et Vargas L., 1987 - The theory of ratio scale estimation: Saaty's analytic hierarchy process. Management Science, vol. 33, n°1, p. 1383- 1403.

Haziza E., 2007 - Contribution au développement de stratégies préventives face au risque de crues éclairs. Thèse de doctorat de l'école des Mines de Paris, Ecole doctorale "Sciences et Métiers de l'Ingénieur", 409 p.

Haziza E., 2008 - Vers une gestion du risque de crue éclair en temps réel pour un appui aux décideurs. Actes du colloque Vulnérabilités sociétales, risques et environnement, Toulouse, 14-16 mai 2008, 3 p.

Hering A., Sénési S., Ambrosetti P. et Bernard-Bouissières I., 2005 - Nowcasting thunderstorms in complex cases using radar data. WSN05 conference, Toulouse 5-9 septembre 2005, proceedings on CD, 7 p.

Hill M. J., Braaten R., Veitch S. M., Lees B. G. et Sharma S., 2005 - Multi-criteria decision analysis in spatial decision support: the ASSESS analytic hierarchy process and the role of quantitative methods and spatially explicit analysis. Environmental Modelling & Software, vol. 20, n°7, p. 955-976

Hinnman R., 1888 - Eclectic Physical Geography. Van Antwerp, Bragg and co., 382 p.

Hodeau D. et Varnier J.-C., 2001 - La démarche autosurveillance de la communauté urbaine de Lyon. La Houille Blanche, n° 5-2001, pp. 19-23

Horvath A., Acs F. et Breuer H., 2009 - On the relationship between soil, vegetation and severe convection storms : hungarians case studies. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 66-81

Hubert G. et Ledoux B., 1999 - Le coût du risque… L'évaluation des impacts socio-économiques des inondations. Presses de l'Ecole Nationale des Ponts et des Chaussées, Paris, 232 pp.

Hutchinson M., 2003a - Interpolation of rainfall data with thin plate smoothing splines: I. Two dimensional smoothing of data with short range correlation. Proceedings of SIC 1997 in Ispra, Italy, pp. 78-92

Hutchinson M., 2003b - Interpolation of rainfall rata with thin plate smoothing splines: II. Analysis of topographic dependence. Proceedings of SIC 1997 in Ispra, Italy, pp. 93-106

Ivanov S. et Palamarchuk J., 2010 - Heat and energy fluxes in the convective cell behind a cold front. Advances in Geosciences, vol. 25, pp. 71-77

Jacquet G., 2007 - Exemple de détection rapide des dysfonctionnements avec CALAMAR. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, pp. 23-24

Johnson J. T., MacKeen P. L., Witt A., De Wayne Mitchell E., Stumpf G., Eilts M. et Thomas K., 1998 - The Storm Cell Identification and Tracking Algorithm: An Enhanced WSR-88D Algorithm. Weather and Forecasting, vol. 13, n°2, p p. 263-276

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhès, J., Hilal M., 2009 - Interpolations par régressions locales : application aux précipitations en France. L'Espace géographique, vol. 2, pp. 157-170

Joly D., Brossard T., Cardot H., Cavailhès, J., Hilal M. et Wavreski, 2008 - Interpolation par recherche d'information locale. Climatologie, vol. 5, pp. 27-48

Jones D., 1955 - 3cm and 10cm wavelenght radiation backscatter from rain. Proceedings of the 5th radar weather conference, American meteorological society, pp. 281-285

Kapfer A. et Jacquet G., 2010 - Utilisation des données radar à travers le service Calamar. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, p.17

Keeney R. L., Raiffa H., 1993 - Decisions with multiple objectives-preferences and value tradeoffs. Cambridge University Press, Cambridge et NewYork, 569 p

Kendrick J. D., Saaty T., 2007 - Use analytic hierarchy process for project selection. Six sigma forum magazine, vol. 6, n°4, pp. 22-29

Khelil A., 1985 - Elaboration d'un système de stockage et exploitation de données pluviométriques. Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, Unité de recherche en génie civil, hydrologie urbaine, 295 p.

Kienberger S., Lang S., Zeil P., 2009, 2009 - Spatial vulnerability units – expert-based spatial modelling of socio-economic vulnerability in the Salzach catchment, Austria. Natural Hazards and earth system sciences, n°9, p. 767–778

Kirstetter P.-E., 2008 - Estimation quantitative des précipitations par radar météorologique : inférence de la structure verticale des pluies, modélisation des erreurs radar-pluviomètres. Thèse de l'université Joseph Fourier Grenoble I,, LTHE, 289 p.

Kirstetter P. E., Delrieu G. et Andrieu H., 2009 - Estimation quantitative des précipitations par radar météorologique : inférence de la structure verticale des pluies, modélisation des erreurs radar-pluviomètres. La Houille Blanche, n°6 , pp. 150-156

Klazura G. E., et Imy D., 1993 - Description of the initial set of analysis products available from the NEXRAD WSR-88D system. Bulletin of the armercian meteorological society, vol. 74, pp. 1293-1311

Krajnc D. et Glavic P., 2005 - A model for integrated assessment of sustainable development. Resources, Conservation and Recycling, n° 43 / 2, p. 189-208

Kreymer A., 2003 - Building safer cities. The future of disaster risk. Washington, the world bank, disaster risk management series n°3, , 299 p.

Krige D.G, 1951 - A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal of Chem., Metal. and Minning Soc. of South Africa, n°52, pp. 119-139

Kyznarova H. et Novak P., 2009 - Celltrack - convective cell tracking algorithm and its use for deriving life cycle characteristics. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 317-327

Laborde J.P., 2004 - Exemple de cartographie d'une variable continue connue de façon discrète mais égalementliée à des champs de variables connues de façon continue. Actes des journées de Climatologie de la Commission Climat et Société, Nancy, pp. 13-30

Laborde J.P., 2009 - Eléments d'hydrologie de surface. Support de cours de l'université de Nice-Sophia Antipolis, Département hydro-informatique et ingénierie de l'eau, édition 2009, 192 pp.

Laborde J.P., Larbi B., Lecocq J. et Dalila M., 2007 - Synthèse cartographique des pluies extrêmes en Algérie du Nord sur des durées de 1h à 24h. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 20, pp. 348-353

Lakshmanan V., 2001 - A Hierarchical, Multiscale Texture Segmentation Algorithm for Real-World Scenes. PhD thesis, University of Oklahoma, Norman, OK, 257 p.

Lakshmanan V., Hondl K. et Rabin R., 2009 - An Efficient, General-Purpose Technique for Identifying Storm Cells in Geospatial Images. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 26, n°3, pp. 523-537

Lakshmanan V. et Smith T., 2009 - Data Mining Storm Attributes from Spatial Grids. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, vol. 26, n°1 1, pp. 2353-2365

Lakshmanan V. et Smith T., 2010 - An Objective Method of Evaluating and Devising Storm-Tracking algorithms. Weather and Forecasting, vol. 25, n°2, pp. 701-709

Lakshmanan V., Rabin R. et DeBrunner V., 2000 - Identifying and tracking storms in satellite images. Second Artificial Intelligence Conference, American Meteorological Society, Long beach, California, pp. 90-95

Lakshmanan V., Rabin R. et DeBrunner V., 2003 - Multiscale storm identification and forecast. Atmospheric Research, n°67-68, pp. 367-38 0

Lanza L, Leroy M., Alexandropoulos C., Stagi L. et Wauben W., 2005 - WMO laboratory intercomparison of rainfall intensity gauges. Final report, WMO, 16pp.

Lanza L. et Stagi L., 2006 - Measuring the uncertainty of rain intensity measurments. Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2006, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 7, pp. 3-7

Lanza L. et Stagi L., 2009a - Laboratory investigation of instruments submitted to the WMO field intercomparison of rain intensity gauges. Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2009, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 8, pp. 240-244

Lanza L. et Stagi L., 2009b - High resolution performance of catching type rain gauges from the laboratory phase of the WMO field intercomparison of rain intensity gauges. Atmospheric Research, vol. 94 - 4a, pp. 55-563

Lanza L., Vuerich E., 2009 - The WMO field intercomparison of rain intensity gauges. Atmospheric Research, vol. 94 - 4a, pp. 534-543

Lanza L., Vuerich E. et Gnecco I., 2010 - Analysis of highly accurate rain intensity measurments from a field test site. Advances in Geosciences, vol. 25, pp. 37-44

Laplace D. et Guivarch J.-Y., 2010 - Utilisation du radar météorologique à Marseille : du risque sanitaire au risque inondation. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, p.18

Laurent A., 2007 - Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain. Thèse, Université de Tours, 393 p.

Laurent A., 2008 - Evaluation du potentiel archéologique du sol en milieu urbain. Actes de la conférence SIG 2008 ESRI, Versailles, 19 p.

Leblois E. et Bois P., 2000 - Méthodes opérationnelles de synthèse climatologique des pluies fortes (évaluation et cartographie). Guide à usage des commanditaires et maîtres d'œuvre, Cemagref de Lyon, 161 p.

Lecourieux O., 1999 - Répartition spatio-temporelle des précipitations du Grand Lyon. Mémoire de DEA Interface Nature Société, Université Jean Moulin Lyon III, 100 p.

Lefèvre A., 2006 - Caractérisation des pluies de la communauté urbaine du Grand Nancy. Rapport de stage de troisième année de l'ESIGEC, GEMCEA, 89 p.

Leleu I., 2007 - Problématique des échanges entre gestionnaires, expérience entre la Direction de l'Eau et Météo-France. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, pp. 29-31

Léone F., 2007 - Caractérisation des vulnérabilités aux « catastrophes naturelles » : contribution à une évaluation géographique multirisque (mouvements de terrain, séismes, tsunamis, éruptions volcaniques, cyclones). mémoire d'habilitation à diriger des recherches (HDR), Montpellier III, laboratoire GESTER, 245 p.

Lepioufle J.-M., 2009 - Modélisation spatio-temporelle d'un champ de pluie. Application aux pluies journalières du bassin versant de la Loire. Thèse de l'université Joseph Fourier Grenoble I,, LTHE, 168 p.

Leroy M., 1999 - Classification d'un site. Note technique de Météo-France, n°35, 12 pp.

Leroy M., 2000 - Estimation de l'incertitude de mesure des précipitations. Note interne de la DSO de Météo-France, n°42, 12 pp.

Leroy M., 2007a - La représentativité de l'observation et les compromis nécessaires. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, pp. 13-14

Leroy M., 2007b - Les facteurs de qualité de la mesure, environnement, instruments, maintenance et les classifications. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, pp. 22-23

Lhotellier R., 2005 - Spatialisation des températures en zone de montagne alpine. Thèse de Géographie de de l'Université Joseph Fourier, Grenoble 1, 352 p.

Lhotellier R., 2006 - Spatialisation de la température minimale de l'air à échelle quotidienne sur quatre départements alpins français. Climatologie, vol. 3, pp. 55-69

Lhotellier R., 2007 - L'incertitude dans un processus de spatialisation de données climatiques. Actes des Huitièmes Rencontres de Théo Quant, Besançon, 10 p.

Liégeois M., 2007 - Les risques en Rhône-Alpes, état de la recherche et prise en compte des sciences de l'homme et de la société. Cahiers risques collectifs et situations de crise - sous la direction de T. Coanus, J. Comby et C Gilbert, Cahiers du CNRS, MSH Grenoble, n°8, 144p.

Lo Conti F., Noto L., Quatrosi A. et La Loggia G., 2009 - Using high resolution raingauge data for storm tracking analysis in the urban area of Palermo, Italy. Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2009, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 8, pp. 166-171

Lutoff C., 2000 - Le système urbain niçois face à un séisme. Méthode d'analyse des enjeux et des dysfonctionnements potentiels. Thèse de doctorat de géographie, Université de Savoie, 367 p.

Manche Y., 1997 - Propositions pour la prise en compte de la vulnérabilité dans la cartographie des risques naturels prévisibles. Revue de Géographie Alpine, n°2, p. 49-62

Manche Y., 2000 - Analyse spatiale et mise en place de systèmes d'information pour l'évaluation de la vulnérabilité des territoires de montagne face aux risques naturels. Thèse de doctorat de géographie, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 175 p.

Marchand J.P., 2004 - Les risques climatiques extrêmes. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 17, pp. 193-196

Marsalek J., 1981 - Calibration of the tipping bucket raingage. Journal of Hydrology, vol. 53, pp. 343-354

Marshall J. et Palmer W., 1948 - The distribution of raindrops with size. Journal of Meteorology, vol. 5, pp. 165-166

Matheron G., 1963 - Principles of geostatistics. Economic Geology, n°58, pp. 1246-1266

Matheron G., 1970 - La théorie des variables régionalisées et ses applications. Les cahiers du centre de morphologie mathématique de Fontainebleau, Paris, 273 p.

Mendoza G. A. et Prabhu R., 2003 - Qualitative multi-criteria approaches to assessing indicators of sustainable forest resource management. Forest Ecology and Management, n° 174 / 1-3, p. 329-343

Merunka D., 1987 - La prise de décision en management avec expert choice. Vuibert Gestion, Paris, 257 p.

Meschinet de Richemond N. et Reghezza M., 2010 - La gestion du risque en France : contre ou avec le territoire ?. Annales de géographie, n° 673, pp. 248-267

Messer H., Zinevich A. et Alpert P, 2006 - Environmental monitoring by wireless communication networks. Science, vol. 312, pp. 713

Messner F. et Meyer V., 2006 - Flood damage, vulnerability and risk perception – Challenges for flood damage research. UFZ Discussion Paper, Leipzig, 26 p.

Météo-France, 2001 - Documents sur la qualité de mesure du radar ARAMIS de Lyon Satolas, et cartographie des échos fixes et des masques observés sur les images de ce radar. Direction des Systèmes d'Observation, DSO, 32 p.

Météo-France, 2006a - Classification de performance maintenue. Note interne de la DSO de Météo-France, n°3, 10 pp.

Météo-France, 2006b - Le projet Salamandre. Rapport d'activité, n°2006, p. 34

Météo-France, 2009 - Rapport annuel. Météo-France, , 131 p.

Météo-France, 2010 – Intégration des données pluviométriques six minutes des stations du Grand Lyon dans la Bdclim. Contribution au projet ANR/EXTRAFLO, DCLIM/AVH en relation la DIRCE, 12 p.

Michaelides S., Levizzani V., Anagnostou E., Bauer P., Kasparis T., Lane J. E., 2009 - Precipitation : measurement, remote sensing, climatology and modelling. Atmospheric Research, vol. 94 - 4a, pp. 512-533

Michaelides S., Pattichis, C. S., and Kleovoulou, G., 2001 - Classification of rainfall variability by using artificial neural networks. International Journal of Climatology, vol. 21, n° 11, pp. 1401–1414

Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement, ministère de l'équipement, des transports et du logement, 1999 - Plan de prévention des risques naturels, risques d'inondation, guide méthodologique. La Documentation Française, Paris, 123 p.

Mitasova H. et Mitas L., 1993 - Interpolation by regularized spline with tension : I. theory and implementation. Mathematical Geology, vol. 25, n°6, pp. 641.655

Moffet A., Garson, J., Sarkar S., 2005 - MultCSync : a software package for incorporating multiple criteria in conservation plannig. Environmental modelling and software, vol. 20, p. 1315-1322

Molines N., 2003 - Méthodes et outils pour la planification des grandes infrastructures linéaires et leur évaluation environnementale. Thèse. Faculté de Sciences Humaines et Sociales, Département de Géographie, Université Jean Monnet, Saint-Etienne, 449 p.

Mottet G., 1997 - Géographie physique de la France (réédition revue et augmentée de 1993). Presse Universitaire de France, Paris, 737 p.

Muller M., Kaspar M., Rezacova D. et Sokol Z., 2009 - Extremeness of meteorological variables as an indicator of extreme precipitation events. Atmospheric Research, vol. 92, issue 3, 308-317

Mustajoki, J., Hamalainen, R., Marttunen, M., 2004 - Participatory multicriteria decision support with Web-HIPRE: a case of lake regulation policy. Environmental Modelling and Software, vol. 19, pp. 537–547

Myers D., 1994 - Spatial interpolation : an overview. Geoderma, n°62, pp. 17-28

Nassar K., Thabet W. et Beliveau Y., 2003 - A procedure for multi-criteria selection of building assemblies. Automation in Construction, vol. 12, n°5, p. 543-560

Neppel L., 1997 - Le risque pluvial en région Languedoc-Roussillon : caractérisation de l'aléa climatique. Thèse, Mécanique, Génie Mécanique, Génie Civil, Science de l'eau dans l'Environnement continental, Université de Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc, 272 p.

Neppel L., Bouvier C. et Niel H., 2006 - Quelques illustrations des sources d'incertitudes dans l'analyse de l'aléa pluvieux. La Houille Blanche, n°6, pp. 22-25

Neppel L., Desbordes M. et Masson J.M., 1998 - Influence de l'évolution dans l'espace et le temps d'un réseau de pluviomètres sur l'observation des surfaces de pluie en fonction de leur aire. Revue des sciences de l'eau, n°1, pp. 43 -60

Niemcznowicz J., 1986 - The dynamic calibration of tipping-bucket raingauges. Nordic Hydrology, vol. 17, pp. 203-214

Novak P., 2007 - The Czech hydrometeorological institute's severe storm nowcasting system. Atmospheric Research, vol. 83, pp. 450-457

Novak P., Brezkova L. et Frolik P., 2009 - Quantitative precipitation forecast using radar echo extrapolation. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 328-334

Nziou Y., 1994 - Analyse de la variabilité spatiale de la pluie sur le site de la communauté urbaine de Lyon. Mémoire de DEA, INSA de Lyon, 94 p.

Oliveau S., 2010 - Autocorrélation spatiale : leçons du changement d'échelle. L'Espace géographique, n°1, pp. 51-64

Openshaw S.O. et Taylor P.J., 1979 - A million or so correlation coefficients: Three experiments on the Modifiable Areal Unit Problem. In Wrigley N. (ed.). Statistical Applications in the Spatial Sciences, Londres : Pion,, p. 127-144

OTHU, 2008 - Rapport d'activité scientifique. 2006 - 2008, 39753, 133 p.

OTT, 2010a - Caractéristiques techniques du Pluvio². Documentation technique du Pluvio², OTT, 1p.

OTT, 2010b - Caractéristiques techniques du disdromètre Parsivel. Documentation technique du disdromètre Parsivel, OTT, 1p.

Paquet E., 2007 - Exemple EDF sur un bassin de montagne. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, pp. 20-21

Paquier A., F. Pons, E. Leblois, F.Rodriguez, 2009 - Influence of rainfall distribution on urban flood: a case study. www.scientificcommons.org, 52522106, IAHR

Parell D., 2007 - Le cas d'EDF, le réseau climatologique. Actes de la journée thématique du Comité consultatif des réseaux d'observations météorologiques de Météo-France, n°2, pp. 16-19

Paturel J.-E., 1991 - Etude des phénomènes pluvieux à une échelle fine d'espace. Contribution à l'analyse du risque en hydrologie urbaine.. Thèse de doctorat, INSA de Lyon, 266 p.

Paturel J.-E. et Chocat B., 1993 - Contribution à l'analyse du risque en hydrologie urbaine. Hydrologie continentale, vol. 8, n°1, pp. 51-61

Paturel J.E. et Chocat B., 1994 - Analysis of the rain phenomenon at fine spatial scale. Water science and technology, n° 1/2, pp. 31-37

Payraudeau S. et Van der Werf H. M. G., 2005 - Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. Agriculture, Ecosystems & Environment, n° 107/1, p. 1-19

Pellarin T., 2001 - Visibilité hydrologique de radars météorologiques opérant en régions montagneuses: application au bassin versant de l'Ardèche. Thèse de l'Université Joseph Fourier, Grenoble I,, 213 p.

Pellarin. T., Delrieu G., Sauliner M., Andrieu H., Vignal B. et Creutin J.D., 2002 - Hydrologic visibility of weather radar systems operating in a mountainous region : case study for the Ardèche catchment (France). Journal of hydrometeorology, n°3, pp. 539-555

Peraudin J.-J., 2003 - Surveillance de la qualité de l'air par cartographie : l'apport de la géostatistique. Actes de la conférence SIG 2003 ESRI, Issy les Moulineaux, 5 p.

Perez J., 1995 - Some comments on Saaty's AHP. Management Science, vol. 41, n°6, p. 1091-1105

Pigeon, P., 2005 - Géographie critique des risques. Economica, collection "anthropos", Paris, 217 p.

Poncelet L., 1959 - Sur le comportement des pluviomètres. Institut météorologique Belge, n°10, pp. 3-58

Précis mécanique, 2006 - Caractéristiques techniques du pluviomètre transducteur à impulsions modèles RO1 3030, 3031 et 3032. Documentation technique, Précis mécanique, 1p.

Préfecture du Rhône, 2004 - Dossier départemental des risques majeurs (DDRM). Document préfecture du Rhône, Lyon, 63 p.

Prodi F., Caracciolo C., D'adderio L., Gnuffi M. et Lanzinger E., 2010 - Comparative investigation of Pludix disdrometer capability as present weather sensor (PWS) during the Wasserkuppe campaign. Atmospheric Research, vol. 95, issue 4, pp. 534-543

Propeck-Zimmermann E., Saint-Gérand T. et Bonnet E., 2009 - Nouvelles approches ergonomiques de la cartographie des risques industriels. Mappemonde, n°4, 19 p.

Propeck-Zimmermann E., Saint-Gérand T. et Bonnet E., 2007 - Probabilités, risques et gestion territoriale : champs d'action des PPRT. Géocarrefour, vol. 82, pp. 65-76

Provitolo D., 2001 - Modélisation et simulation du risque d'inondation en milieu urbain méditerranéen. Actes de la 5ème rencontre de ThéQuant, 5, pp. 1-12

Provitolo D., 2002 - Risque urbain, catastrophe et villes méditerranéennes. thèse de l'université de Nice Sophia, Antipolis, 365 p.

Provitolo D., 2006 - Vulnérabilité aux inondations méditerranéennes en milieu urbain : une nouvelle démarche géographique. Annales de géographie, n°653, pp. 23-40

Provitolo D., 2007 - La vulnérabilité aux inondations méditerranéennes : une nouvelle démarche géographique. Annales de géographie, n°65 3, pp. 23-40

Pujol O., Mesnard F., Costes C., Sauvageot H. Bon N. et Artis J.-P., 2009 - Simulations of X band thunderstorm airborn radar observations. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 310-316

Ramos-Domingues M.-H., 2002 - Analyse de la pluviométrie sous des systèmes nuageux convectifs. Etude de cas sur des données de la ville de Marseille et de la méthode ISIS de Météo-France. Thèse de doctorat, LTHE, Université Joseph Fourier – Grenoble I, 153 p.

Ramos-Domingues M.-H., 2003 - La désagrégation de l'information de pluie. La Houille Blanche, n°6, pp. 122-128

Raymond M., Peyron N., Martinoni S., Magnouloux A. et Alfonsi F., 2010 - Gestion des crues sur Saint-Etienne Métropole. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, p.22

Reghezza M., 2009 - Géographes et gestionnaires face à la vulnérabilité métropolitaine. Quelques réflexions autour du cas francilien. Annales de géographie, n°669, pp. 459-477

Reghezza M., 2006 - Réflexions autour de la vulnérabilité métropolitaine : la métropole parisienne face au risque de crue centennale. Thèse de géographie, Université Paris X - Nanterre, 384 p.

Renard F. et Chapon P.-M., 2009 - Assessment of vulnerability in urban systems for a global risk analysis associated with rainfall hazard. Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas. Rainfall in the Urban Context: Forecasting, Risk and Climate Change, St-Moritz (Suisse), décembre 2009, pp. 193-197

Renard F. et Chapon P.-M., 2010 - Une méthode d'évaluation de la vulnérabilité urbaine appliquée à l'agglomération lyonnaise. L'Espace géographique, n°1, pp. 35-50

Renard F., Chapon P.M., Furusho C. et Comby J., 2011 - Assessing the accuracy of weather radar to track intense rainfall cells : a case study in the Greater Lyon, France. Atmospheric Research, article accepté sous réserve de modifications, parution prévue début 2011, 19 p.

Renard F. et Comby J., 2006 - Evaluation de techniques d'interpolation spatiale de la pluie en milieu urbain pour une meilleure gestion d'événements extrêmes : le cas du Grand Lyon. La Houille Blanche, n° 6, pp. 73-78

Renard F. et Comby J., 2007 - Caractérisation de l'aléa pluviométrique en milieu urbain: le cas du Grand Lyon. Climatologie, n°4, pp. 131-144

Renard F. et Comby J., 2010a - Overview of the Greater Lyon weather radar advances from 90's to 2008. Advances in Geosciences, vol. 25, pp. 79-83

Renard F. et Comby J., 2010b - Apport de la géomatique dans l'étude des trajectoires des cellules de pluie intense et application au radar rhônalpin. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 23, 6 p.

Renard F., Faure D. et Comby J., 2009 - Evaluation de la qualité de mesure hydrologique du radar de Lyon appliquée au contexte local de la communauté urbaine (période 2001 - 2006). La Houille Blanche, vol. 6, pp. 56-59

Renard F. et Riquier J., 2008 - Analyse territorialisée du risque de débordements de réseau d'assainissement liés aux eaux pluviales urbaines : application au Grand Lyon. Norois, n°208, pp. 45-60

Renard F. et Sarr A., 2009 - Quantification spatiale de la pluie en milieu rural sahélien (Sénégal) et en milieu urbain tempéré (Grand Lyon). Sécheresse – Sciences et changements planétaires, vol. 20, n°3, pp. 244-252

Renard F. et Volte E., 2009 - Etude des débordements de temps de pluie du système d'assainissement du Grand Lyon. Techniques Sciences Méthodes, n° 7/8, pp. 30-38

Renard F., Volte E., Didier J.-M. et Bret P., 2010 - Comparaison spatiale des débordements observés et modélisés du réseau d'assainissement du Grand Lyon par temps de pluie.

Novatech 2010 – 7ème conférence internationale sur les techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, Lyon, juin 2010, 9 p.

Rigol J.P., Jarvis C et Stuart N., 2001 - Artificial neural networks as a tool for spatial interpolation. International Journal of GIS, vol. 15, n°4, pp. 323-343

Rome S., 2006 - Aléa cyclonique et vulnérabilité des sociétés. Actes des Journées de Climatologie de la Commission Climat et Société du CNFG, l'apport des géographes-climatologues, p. 71-88

Rome S., 2008 - Le risque cyclonique dans l'Atlantique en 2008. Echogéo, n°6, 13 p.

Rome S., Bigot S., Dumas D., 2009 - Les extrêmes thermiques et la circulation atmosphérique dans les pré-alpes françaises (massif du Vercors, 2004-2008). Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 22, pp. 395-400

Rosenfeld D., 1987 - Objective method for analysis and tracking of convective cells as seen by radar. J. Atmos. Oceanic Technol., n°42, pp. 422 -434

Roy B., 1985 - Méthodologie multicritère d'aide à la décision. Economica, Paris, 423 p.

Roy B., Bouyssou D., 1993 - Aide Mutlicritère à la Décision : Méthodes et Cas. Collection Gestion, Economica, 695 p.

Rubbel F. et Brugger K., 2009 - 3-hourly quantitative precipitation estimation over Central and Northern Europe from rain gauge and radar data. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 4, pp. 544-554

Rueneuve S., 2001 - Evaluation spatio-temporelle des précipitations du Grand Lyon. Mémoire de DEA Interface Nature Société, Université Jean Moulin Lyon III, 95 p.

Rufat S., 2007 - L'estimation de la vulnérabilité urbaine, un outil pour la gestion du risque. Approche à partir du cas de l'agglomération lyonnaise. Géocarrefour, vol. 82, pp.7–16

Rufat S., 2008 - Transition post-socialiste et vulnérabilité urbaine à Bucarest. Thèse de géographie, Ecole Normale Supérieure lettres et sciences humaines, 387 p.

Rufat S., 2009 - Estimation de la vulnérabilité urbaine à Bucarest. Mappemonde, n°95, 23 p.

Ruin I., Gaillard J.-C. et Lutoff C., 2007 - How to get there ? Assessing motorists' flash flood risk perception on daily itineraries. Environmental Hazards, vol. 7, pp. 235-244

Ruin I. et Lutoff C., 2004 - Vulnérabilité face aux crues rapides et mobilités des population en temps de crise. La Houille Blanche, vol. 6, pp. 114-119

Saaty T. L., 1976 - A scaling method for priorities in hierarchical structures. Journal of mathematical psychology, n°15 / 3, p. 234-281

Saaty T. L.1980 - The Analytic Hierarchy Process. McGraw-Hill, New York, 287 p.

Saaty T. L., 1993 - What is relative measurement ? The ratio scale phantom. Mathematical and Computer Modelling, vol.17, n°4/5, p. 1-12

Saaty T. L., 1994 - Highlights and critical points in the theory and application of the Analytic Hierarchy Process. European Journal of Operational Research, n°74, p.426-447

Saaty T. L., 2008 - Relative measurement and its generalization in decision making. Why pairwise comparisons are central in mathematics for the measurement of intangible factors. The analytic hierarchy / network process. Review of the royal Spanish academy of Sciences, Series A, Mathematics, vol. 102, p. 251-318

Saaty T. L., Hu, 1998 - Ranking by eigenvector versus other methods in the analytic Hierarchy Process. Applied Mathematics Letters, vol.11, n°4, p. 121-125

Sadouki L., Haddad B., et Adane A., 2004 - Estimation des précipitations à partir des images satellitales. Actes de l'association internationale de climatologie, vol. 17, pp. 79-81

Salagnac J.-L., 2006 - Rendre les bâtiments moins vulnérables aux risques naturels. Responsabilité et environnement, n° 43, pp. 47-52

Sauvageot H., 1994 - Rainfall measurment by radar : a review. Atmospheric Research, vol. 35, pp. 27-54

Scharlig A., 1985 - Décider sur plusieurs critères. Panorama de l'aide à la décision multicritère. Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, coll. Diriger l'Entreprise, 303 p.

Sénési S., 2002 - Suivi et prévision d'orage. Usage de données satellites, radar et foudre. La Houille Blanche, n°2, pp. 50-51

Sevruk B. et B. Hamon, 1984 - International comparison of national precipitation gauges with a reference pit gauge. WMO, instruments and oberving methods, Genève, n°17, 135 pp.

Sevruk B. et Nespor V., 1994 - The effect of dimensions and shape of precipitation gauges on the wind-induced error. In: M. Desbois and F. Desalmand (eds.): Global Precipitation and Climate Change, NATO ASI Series, Springer, Verlag, Berlin, pp. 231–246

Sevruk B., Ondras M. et Chvila B., 2009 - The WMO precipitation measurement intercomparisons. Atmospheric Research, vol. 92, issue 3, 376-380

Sevruk B., Ondras M. et Molnar P., 2006 - History of precipitation measurment intercomparisons : the WMO role. Proceedings of the 7th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2006, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 7, pp. 22-26

Silverman B. W., 1986 - Density Estimation for Statistics and Data Analysis. Chapman and Hall, New-York, 175 p.

Sims A., 1964 - Case studies of areal variations in raindrop size distributions. Proceedings of the 11th radar weather conference, American meteorological society, pp. 162-165

Sokol Z., 2009 - Effects of an assimilation of radar and satellite data on a very short range forecast of heavy convective rainfalls. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 188-206

Stalker R. et Knupp K., 2002 - A Method to Identify Convective Cells within Multicell Thunderstorms from Multiple Doppler radar data. Monthly weather review, vol. 130, pp. 188-195

Struzer L., 1971 - Practability analysis of rain gauge international comparison test results. Voyeykov Main Geophysics Oberver, vol. 260, pp. 77-94

Svoray T., Bar Kutiel P., Bannet T., 2005 - Urban land-use allocation in a Mediterranean ecotone: Habitat Heterogeneity Model incorporated in a GIS using a multi-criteria mechanism. Landscape and Urban Planning, vol. 72, n°4, p. 337-351

Szolgay J., Parajka J., Kohnova S.et Hlavcova K., 2009 - Comparison of mapping approaches of design annual maximum daily precipitation. Atmospheric Research, vol. 92, issue 3, 289-307

Tabary P., 2007 - The new French operational radar rainfall product. Part 1: methodology. Weather and Forecasting, vol. 22, pp. 393-408

Tabary P., Desplats K., Do Khac K., Eideliman F., Gueguen C. et Heinrich J. C., 2007 - The new French operational radar rainfall product. Part 2: validation. Weather and Forecasting, vol. 22, pp. 409-427

Testud J., 2010 - Les radars polarimétriques en bande X pour l'hydrométéorologie. Actes du forum des utilisateurs de radars météorologiques, Météo-France, centre international de conférence, Toulouse, p.12

Thiessen A. H., 1911 - Precipitation averages for large areas. Monthly weather review, vol. 39, pp. 1082-1084

Thouret J.C. et Léone F., 2003 - Aléas, vulnérabilités et gestion des risques naturels - In : Questions de Géographie. Les Risques. Editions du Temps, Paris, pp. 37-70

Tixier J., Dandrieux A., Dusserre G., Bubbico R., Mazzarotta B., Silvetti B., Hubert E., Rodrigues N., Salvi O., 2006 - Environmental vulnerability assessment in the vicinity of an

industrial site in the frame of ARAMIS European project. Journal of Hazardous Materials, n° 130, p. 251–264

Tomczak M., 2003 - Spatial interpolation and its uncertainty using automated anisotropic Inverse Distance Weighing (IDW) - Cross-validation/Jackknife approach. Proceedings of SIC 1997 in Ispra, Italy, pp. 51-62

Van Baelen J., Tridon F. et Pointin Y., 2009 - Simultaneous X-band and K-band study of precipitation to derive specific Z-R rematioships. Atmospheric Research, vol. 94 - issue 1-3, pp. 596-605

Veyret Y., 2003 - Les risques. SEDES, collection DIEM, Paris, 255 p.

Veyret Y. et Reghezza M., 2005 - Aléas et risques dans l'analyse géographique. Annales des mines - responsabilité et environnement, n°40, pp. 61-67

Veyret Y. et Reghezza M., 2006 - Vulnérabilité et risques. L'approche récente de la vulnérabilité. Responsabilité et environnement, n° 43, pp. 9.13

Vigneau J.-P., 1986 - Climat et climats des Pyrénées orientales. Thèse de doctorat, Toulouse, JPV éd., 618 p.

Vigneau J.-P., 2004 - Un siècle de "type de temps". Norois, n°191, vol.2, pp. 11-24

Vigneau, J.-P., 2005 - Climatologie. Armand Colin Campus, Paris, 200 p.

Villessot D. et Pin X., 2008 - Le risque pluvial pour les réseaux d'assainissement. Techniques Sciences Méthodes, n°12, pp. 37-45

Vincendon J.-C. et Carrière J.-M., 2009 - Les prévisions opérationnelles de précipitations à Météo-France. La Houille Blanche, n°6, pp. 24-29

Vinet F., 2004 - Diagnostic et enjeux de la gestion du risque inondation en France Méditerranéenne. La Houille Blanche, vol. 6, pp. 76-82

Volte E., Varnier J.-C., Pecoraro J., 2007 - Débordements des réseaux d'assainissement de la communauté urbaine de Lyon. Actes de la conférence Novatech, 6ème conférence internationale, Techniques et stratégies durables pour la gestion des eaux urbaines par temps de pluie, pp 99-106

Vuerich E., Lanza L. et Stagi L., 2009a - WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges : the field calibration (Italy, 2007-2009). Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2009, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 8, pp. 268-272

Vuerich E., Monesi C., Lanza L. et Stagi L., 2009b - Results of the WMO field intercomparison of rainfall intensity gauges (Italy, 2007-2009). Proceedings of the 8th International Workshop on Precipitation in Urban Areas, December 2009, Saint-Moritz, Switzerland, vol. 8, pp. 258-262

Wackernagel H., 2003 - Multivariate geostatistics : an introduction with applications, 2nd edition. Springer-Verlag, Berlin357 p.

Wand M. et Jones M., 1995 - Kernel smoothing, volume 60 de Monographs on Statistics and Applied Probability. Chapman and Hall Ltd., London, 223 p.

Waniez P., 2003 - Manuel d'utilisation de Philcarto. Version 3.1, pour Windows ®, 239p.

Weissman M. et Klemp J., 1984 - The structure and classification of numerically simulatedconvective stormsin directionaly varying wind shears. Monthly weather review, n°112, pp. 2479-2498

Wilk K. E., et Gray K., 1970 - Processing and analysis techniques used with the NSSL weather radar system. Preprints, 14th Radar Meteorology Conf., Tucson, AZ, Amer. Meteor. Soc., pp. 369–374

Wong D. et Amrhein C., 1996 - Research on the MAUP: old wine in a new bottle or real breakthrough. Geographical Systems, vol. 3, no 2-3,, p. 73-76

World Meteorological Organization, 2007 - WMO Field Intercomparison of Rainfall Intensity Gauges. WMO data management report, n°2, 140 pp.

World Meteorological Organization, 2008 - Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation. WMO-No. 8, Seventh edition, 678 pp.

Yates E., Anquetin S., Ducrocq V., Creutin J.-D., Ricard D. et Chancibault K., 2006 - Point and areal validation of forecast precipitation fields. Meteorological Applications, vol. 13, pp. 1-20

Yue J., Bintong C., Minchiang W., 1998 - New approaches to Analytical Hierarchy Process. Proceedings of the INFORMS meeting, Seattle, USA, October 25-28, 1998, 12 p.

Zaninetti J.-M., 2005 - Statistique spatiale, méthodes et applications géomatiques. Hermes Science Publications, Paris, 321 p.

Zinevich A., Alpert P. et Messer H, 2008 - Estimation of rainfall fields using commercial microwave communication networks of variable density. Advances in water ressources, vol. 31, pp. 1470-1480

Sites Internet consultés :

www.alicime.com

www.arm.gov

www.geoportail.fr

www.grandlyon.com

www.grandlyon.com/PLU

www.ott.com

www.precis-mecanique.com

www.prepared-fp7.eu

www.thiesclima .com

www.vaisala.com

Liste des figures

Une nouvelle numérotation de figures est effectuée pour chacune des parties du texte.

Introduction

Figure 1.1 : Localisation de la communauté urbaine de Lyon en France 23
Figure 1.2 : Communes du Grand Lyon..... 24
Figure 1.3 : Organigramme de la Direction de l'eau du Grand Lyon 25
Figure 1.4 : Topographie et réseau hydrographique du Grand Lyon 26
Figure 1.5 : Organisation générale du manuscrit 35

Chapitre 1 - Partie 1

Figure 2.1 : Types de mesure des précipitations 38
Figure 2.2 : Schéma d'un pluviomètre (adapté de Laborde, 2009)..... 40
Figure 2.3 : Schéma de pluviographe à niveau d'eau avec siphon (adapté de Laborde, 2009) 41
Figure 2.4 : Augets basculeurs (vue de dessus, pluviomètre Précis Mécanique RO1 3030A du Grand Lyon – cliché : direction de l'eau du Grand Lyon) 41
Figure 2.5 : Principe de fonctionnement des augets basculeurs (adapté de Laborde, 2009).. . 42
Figure 2.6 : Pluviographes à pesée avec superficie de l'orifice (cm^2) et hauteur de contenance (mm). (Modèle Pluvio² de Ott ; adapté de Ott, 2010a) 43
Figure 2.7 : Différents types de disdromètres optiques..... 45
Figure 2.8 : Disdromètre à impact..... 46
Figure 2.9 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 1 de Météo-France (Leroy, 1999)..... 48
Figure 2.10 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 2 de Météo-France (Leroy, 1999)..... 48
Figure 2.11 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 3 de Météo-France (Leroy, 1999)..... 49
Figure 2.12 : Paramètres nécessaires pour répertorier un site en classe 4 de Météo-France (Leroy, 1999)..... 49
Figure 2.13 : Différentes formes de pluviomètres généralement rencontrées..... 51
Figure 2.14 : Illustration de l'erreur mécanique inhérente et systématique des pluviomètres à augets basculeurs en huit photographies consécutives..... 53
Figure 2.15 : Courbes de réponses des intensités mesurées (I measured) en fonction des intensités de référence (I reference) (en mm/h) des pluviomètres à augets basculeurs (les tirets matérialisent les courbes d'erreurs de 5%) (Lanza et al., 2005). 57
Figure 2.16 : Courbes de réponses des intensités mesurées (I measured) en fonction des intensités de référence (I reference) (en mm/h) des pluviomètres à pesée (les tirets matérialisent les courbes d'erreurs de 5%) (Lanza et al., 2005). 57
Figure 2.17 : Courbes de réponses des intensités mesurées (I measured) en fonction des intensités de référence (I reference) (en mm/h) des pluviomètres à niveau d'eau (les tirets matérialisent les courbes d'erreurs de 5%) (Lanza et al., 2005). 58

Figure 2.18 : Site expérimental de l'intercomparaison IVb de l'OMM à Vigna di Valle (Italie) (Vuerich et al., 2009a) 60
Figure 2.19 : Nuages de régression des différents dispositifs de mesure entre les intensités de référence et les intensités mesurées (mm/h) : pluviomètres à augets sans correction (a), pluviomètres à augets avec correction (b) (c) et (d), pluviomètres à lecture du niveau d'eau (d), pluviomètres à pesée (e) et appareils non captant (f) (Lanza et al., 2010). 61
Figure 2.20 : Pluviomètre de Mions (cliché : direction de l'eau du Grand Lyon) 63
Figure 2.21 : Pluviomètres opérationnels et désaffectés du Grand Lyon 66
Figure 2.22 : Polygones de Thiessen fondés sur l'ensemble des pluviomètres opérationnels du Grand Lyon 72
Figure 2.23 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé avec la méthode des polygones de Thiessen 73
Figure 2.24 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 29 juin 1993 interpolé avec la méthode des polygones de Thiessen 74
Figure 2.25 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé avec la méthode de l'inverse de la distance 75
Figure 2.26 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 29 juin 1993 interpolé avec la méthode de l'inverse de la distance 76
Figure 2.27 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 spatialisé par splines d'interpolation 77
Figure 2.28 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 spatialisé par splines d'interpolation 77
Figure 2.29 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé par régression classique 79
Figure 2.30 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par régression classique 79
Figure 2.31 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé par régression locale 81
Figure 2.32 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par régression locale 81
Figure 2.33 : Exemple schématique de semi variogramme expérimental 83
Figure 2.34 : Exemples schématiques de modèles de semi variogrammes parmi les plus courant. a) modèle linéaire avec palier ; b) modèle sphérique ; c) modèle exponentiel ; d) modèle gaussien 84
Figure 2.35 : Exemple schématique de semi variogramme sphérique avec les trois paramètres fondamentaux : la portée, le pallier et l'effet de pépite 85
Figure 2.36 : Cumul pluviométrique de l'année 1988 interpolé par krigeage ordinaire 86
Figure 2.37 : Cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par krigeage ordinaire 86
Figure 2.38 : Variogramme expérimental du cumul pluviométrique du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique 87
Figure 2.39 : Erreurs types d'estimation pour le cumul pluviométrique du 29 juin 1993 interpolé par krigeage ordinaire 87
Figure 2.40 : Spatialisation du cumul pluviométrique du 29 juin 1993 estimé par les cinq méthodes d'interpolation spatiale retenues pour l'évaluation. Respectivement de gauche à droite et de haut en bas : inverse des distances, splines d'interpolation, régression classique, régression locale et krigeage ordinaire 89
Figure 2.41 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque cumul pluvieux annuel 93
Figure 2.42 : Moyennes des erreurs absolues (%) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque cumul pluvieux annuel 93
Figure 2.43 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque hauteur d'eau cumulées par épisodes intenses 94
Figure 2.44 : Moyennes des erreurs absolues (mm) par validation croisée de chaque méthode d'interpolation sur chaque hauteur d'eau à faible pas de temps de l'épisode du 29 juin 1993 95

Figure 3.1 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls annuels sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 100
Figure 3.2 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls annuels à proximité du Grand Lyon, période 1988 – 2008 (postes pluviométriques du réseau de Météo-France) 100
Figure 3.3 : Hauteurs d'eau annuelles (mm) sur le Grand Lyon (moyenne des pluviomètres opérationnels) 101
Figure 3.4 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de l'automne sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 102
Figure 3.5 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de l'hiver sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 102
Figure 3.6 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls du printemps sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 103
Figure 3.7 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de l'été sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 103
Figure 3.8 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de mai sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 104
Figure 3.9 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de septembre sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 104
Figure 3.10 : Krigeage ordinaire de la moyenne des cumuls de septembre sur le Grand Lyon, période 1988 - 2008 105
Figure 3.11 : Moyennes mensuelles des hauteurs d'eau (mm) sur le Grand Lyon, (moyenne des pluviomètres opérationnels pour la période 1988 - 2008) 106
Figure 3.12 : Analyse en composantes principales des pluies observées à Lyon entre 1988 et 2000 (Chocat et Bardin, 2002). 110
Figure 3.13 : Répartition temporelle annuelle (%) de chacun des types de pluies remarquables (période 1988 – 2005) 114
Figure 3.14 : Répartition temporelle horaire (%) des trois types de pluies remarquables (période 1988 – 2005) 115
Figure 3.15 : Krigeage ordinaire de l'épisode du 1er décembre 2003 116
Figure 3.16 : Krigeage ordinaire de l'épisode du 03 novembre 1989 117
Figure 3.17 : Krigeage ordinaire des écarts au cumul moyen des épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau (65 mm) 118
Figure 3.18 : Krigeage ordinaire des écarts au cumul moyen des épisodes remarquables en termes de durée (45,4 mm) 120
Figure 3.19 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 07 août 1997 121
Figure 3.20 : Krigeage ordinaire des écarts au cumul moyen des épisodes remarquables en termes d'intensité maximale (15,17 mm) 123
Figure 3.21 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 09 septembre 2002 124
Figure 3.22 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 07 septembre 1995 124
Figure 3.23 : Krigeage ordinaire de la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 21 août 1992 125
Figure 3.24 : Variogramme omnidirectionnel du cumul pluvieux du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique (distance en mètres) 126

Figure 3.25 : Variogramme selon l'orientation de 40°N du cumul pluvieux du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique (distance en mètres). Dans ce cas, la portée de 26,17 km est maximale..... 127
Figure 3.26 : Variogramme selon l'orientation de 102°N du cumul pluvieux du 07 septembre 1995, ajusté avec un modèle sphérique (distance en mètres). Dans ce cas, la portée de 7, 68 km est minimale. 127
Figure 3.27 : Portée en fonction de l'angle d'orientation du vecteur de translation 128
Figure 3.28 : Suivi du déplacement du noyau pluvieux de forte intensité de l'épisode du 29 juin 1993, de 15h30 à 15h48 133

Chapitre 2 - Partie 1

Figure 4.1 : Schéma de principe de propagation des ondes électromagnétiques (source : www.alicime.com) 141
Figure 4.2 : Les radars du réseau de mesure Aramis de Météo-France en 2010 (Champeaux et al., 2009)..... 148
Figure 4.3 : Carte de visibilité hydrologique du réseau Aramis (Champeaux et al., 2009) ... 149
Figure 4.4 : Localisation du radar de Satolas 150
Figure 4.5 : à gauche, orthophoto de 1997 – le radar est bien visible (en jaune) à gauche sur le bâtiment ; à droite, orthophoto de 2003 – le radar a été déplacé sur le site de Saint-Nizier d'Azergues 150
Figure 4.6 : Localisation du radar de Saint-Nizier d'Azergues..... 151
Figure 4.7 : Photographie aérienne du site du radar de Saint-Nizier d'Azergues. Le radar est désormais placé sur une crête, à 920m d'altitude (source : www.geoportail.fr)..... 152
Figure 4.8 : Photographie au sol du radar de Saint-Nizier d'Azergues, sous son radôme (cliché : Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France)..... 152
Figure 4.9 a : Cumul pluviométrique de l'événement du 29 juillet 2005 de 16h30 à 16h45. Carte issue du cumul de trois images de réflectivité, à comparer avec la figure 4.9 b, correspondant à la lame d'eau au sol pour la même période. L'advection sur l'image de la lame d'eau est nettement visible (fig. 4.9 b), le cumul apparaît clairement plus lissé et moins saccadé que celui des données de réflectivité (fig. 4.9 a). Cela est particulièrement perceptible lorsque l'on examine le noyau de pluie de forte intensité au nord-ouest de l'agglomération. 156
Figure 4.9b : Cumul pluviométrique de l'événement du 29 juillet 2005 de 16h30 à 16h45. Carte correspondant à la lame d'eau au sol ce cette période (à comparer à la figure 4.9 a). L'advection sur l'image de la lame d'eau est nettement visible (fig. 4.9 b), le cumul apparaît clairement plus lissé et moins saccadé que celui des données de réflectivité (fig. 4.9 a). Cela est particulièrement perceptible lorsque l'on examine le noyau de pluie de forte intensité au nord-ouest de l'agglomération. 157
Figure 4.10 : Angles d'élévation du radar de Saint-Nizier sur le Grand Lyon (source : fourni par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France)..... 161
Figure 4.11 : Analyse Météo-France des échos fixes et des masques du radar de Lyon Satolas (Météo-France, 2001)..... 163
Figure 4.12 : Orthophoto du site du radar et de la gare SNCF..... 164
Figure 4.13 : Photographie de la gare SNCF de 39 mètres de haut (cliché : F. Renard) 165
Figure 4.14 : Cumul des lames d'eau radar de mars 2001. La croix matérialise l'emplacement du radar de Satolas (Météo-France, 2001) 166
Figure 4.15 : Interpolation des mesures pluviométriques du réseau de Météo-France de mars 2001. La croix matérialise l'emplacement du radar de Satolas (Météo-France, 2001) 166

Figure 4.16 : Cumul radar de la journée du 22 septembre 1993 sur l'ensemble de sa zone de couverture 168
Figure 4.17 : Cumul radar de la journée du 22 septembre 1993 sur le Grand Lyon 168
Figure 4.18 : Cumul de la journée du 22 septembre 1993 sur le Grand Lyon à partir du réseau pluviométrique au sol 169
Figure 4.19 : Description des interactions ondes-relief (adapté de Delrieu et al. 1995). La surface matérialisée par les triangles noirs est déterminée par une intégration numérique détaillée sur chaque volume de résolution. Pour cela, une fonction de pondération angulaire et une fonction de pondération radiale sont utilisés (*angular weighting function* and *range weighting function*). 171
Figure 4.20 : Relief présent dans la zone de couverture du radar météorologique de Saint-Nizier (issu de la BD Alti ® de l'IGN, résolution de 250 m) 172
Figure 4.21 : Modèle de PVR utilisé. Il s'agit d'un PVR relatif exprimé sous la forme z(h) - z(href) (à droite), ou Z(h)/Z(href) (à gauche). h est l'altitude de détection d'un élément de l'atmosphère, et href une altitude de référence. Cette altitude est fixée ici au niveau de la mer (source : Faure, 2005) 173
Figure 4.22 : Simulation de l'intensité des échos de sol dans les images du radar de Saint-Nizier. Echelle linéaire exprimée en dBZ (source : Faure, 2008) 176
Figure 4.23 : Simulation de l'importance des masques dans la vision du radar de Saint-Nizier. Echelle linéaire exprimée en pourcentage de puissance du faisceau masquée (source : Faure, 2008) 176
Figure 4.24 : Simulation de la visibilité hydrologique du radar de Saint-Nizier pour le modèle de PVR utilisé. (source : Faure, 2008) 177
Echelle exprimée en rapport « mesure erronée/valeur réelle » des intensités de pluie en mm/h : jaune = très bonne qualité ; vert puis bleu = sous-estimation croissante. Les pixels d'échos fixes dont la valeur est jugée pénalisante pour l'exploitation hydrologique ont une qualité nulle et apparaissent en brun. 177
Figure 4.25 : Résultat de la simulation des échos fixes sur le Grand Lyon. Les Monts d'Or, le plateau de Fourvière et le sud-est de l'agglomération se trouvent impactés. Ces zones coïncident avec celles de la figure 4.12 qui représentent les secteurs où l'angle de site est le plus élevé. 178
Figure 4.26 : Hauteur d'eau cumulée des données de réflectivité des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006, convertie en équivalent d'eau à l'aide de la relation de Marshall-Palmer, 1948, sur l'ensemble de la couverture du radar 180
Figure 4.27 : Hauteur d'eau cumulée des données de réflectivité des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006, convertie en équivalent d'eau à l'aide de la relation de Marschall-Palmer, 1948, sur le Grand Lyon 181
Figure 4.28 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006 sur l'ensemble de la couverture du radar 182
Figure 4.29 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau des 41 journées de l'échantillon de la période 2001-2006 sur le Grand Lyon 183
Figure 4.30 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 1er mai 2002. On note des valeurs de pixels fortement surestimées. 184
Figure 4.31 : Cumul pluviométrique de l'épisode du 1er décembre 2003. On note des valeurs de pixels fortement sous-estimés, ainsi que des absence de valeurs dans la zone pluvieuse. 184
Figure 4.32 : Localisation des échos fixes sur le Grand Lyon pour la période 2001-2006.... 186
Figure 4.33 : Atténuation par des masses pluvieuses de forte intensité, lors de l'épisode du 29 juillet 2005, à 13h40, au nord-ouest du radar. Cette atténuation ne perturbe pas la mesure sur le Grand Lyon. 187

Figure 4.34 : La sous-estimation avec la distance liée à l'élévation du faisceau est manifeste sur la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 1er décembre 2003 188
Figure 4.35 : L'effet de bande brillante aux alentours du radar est indéniable sur la hauteur d'eau cumulée de l'épisode du 23 novembre 2002 188
Figure 4.36 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau *Panthere* du mois de juillet 2008 sur l'ensemble de la couverture du radar 189
Figure 4.37 : Hauteur d'eau cumulée des lames d'eau du mois de juillet 2008 sur le Grand Lyon 190
Figure 4.38 : Echos fixes des lames d'eau *Hydram* et possibilité d'interactions électromagnétiques et radioélectriques sur le territoire du Grand Lyon (contours issus des servitudes d'utilité publiques (SUP) du plan local d'urbanisme (PLU) du Grand Lyon, 2010) 191
Figure 4.39 : Extraction ponctuelle des pixels radars à la verticale des pluviomètres du Grand Lyon 193
Figure 4.40 : Extraction pseudo-ponctuelle des pixels radars à la verticale des pluviomètres du Grand Lyon 194
Figure 4.41 : Moyenne (mm) des cumuls des hauteurs d'eau des épisodes pluvieux de la sélection par le réseau pluviométrique et le radar météorologique (valeurs de réflectivité et de lames d'eau au sol), et présence de bandes brillantes 196
Figure 4.42 : Cumul des hauteurs d'eau des lames d'eau de l'épisode pluvieux du 1er mai 2002 non remis à niveau (en haut), puis remis à niveau (en bas) à l'aide d'un facteur correctif issu des pluviomètres du Grand Lyon 197
Figure 4.43 : Ecarts moyens relatifs (%) entre pluviomètres et lames d'eau ou réflectivité radar en fonction du type d'épisodes pluvieux remarquables considérés (épisodes remarquables en termes d'intensité, de hauteur précipitée ou de durée) 201
Figure 4.44 : Ecarts moyens relatifs (%) par événements entre pluviomètres et lames d'eau radar en fonction de l'intensité moyenne maximale en 18 minutes (mm/h) de chaque épisode pluvieux 202
Figure 4.45 : Ecarts moyens relatifs (%) par événements entre pluviomètres et lames d'eau radar en fonction de la hauteur d'eau totale moyenne (mm) de chaque épisode pluvieux 203
Figure 4.46 : Ecarts moyens relatifs (%) par événements entre pluviomètres et lames d'eau radar en fonction de la durée (h) de chaque épisode pluvieux 203
Figure 4.47 : Hauteurs d'eau cumulées (mm) du réseau de mesure au sol du Grand Lyon et des lames d'eau *Panthere* : mois et épisodes pluvieux de juillet 2008 205
Figure 4.48 : Interpolation spatiale des hauteurs d'eau de l'épisode du 1er mai 2002 par krigeage ordinaire (à gauche) et par cokrigeage ordinaire (à droite). Ces cumuls sont à rapprocher de ceux de la figure 4.42 issus des données radars filtrées. La différence entre l'interpolation par krigeage et cokrigeage est minime. 207
Figure 4.49 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 09 septembre 2002 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite) 210
Figure 4.50 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 04 août 2004 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite) 211
Figure 4.51 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 23 novembre 2002 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite) 211
Figure 4.52 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 14 juillet 2001 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite)..... 212
Figure 4.53 : Interpolation spatiale par krigeage ordinaire des hauteurs d'eau de l'épisode du 16 octobre 2002 à partir des pluviomètres (à gauche) et des lames d'eau radar (à droite) 212

Figure 5.1: Représentation de la fréquence et de la distribution des orages au milieu du 19ème siècle (source : Hinman, 1888). 217
Figure 5.2 : Intensité de pluie (mm/h) le 29 juillet 2005 à 15h45 (données : réflectivité radar convertie en intensité de pluie suivant Marshall-Palmer 1948) 220
Figure 5.3 : Intensité de pluie (mm/h) à 15h45 le 29 juillet 2005, avec application de différents filtres d'intensité. De gauche à droite et de haut en bas ont respectivement été appliqués aux cinq cartes des filtres d'intensité de 20 mm/h, 40 mm/h, 60 mm/h, 80 mm/h et 100 mm/h (légende identique pour les cinq cartes) 222
Figure 5.4 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 à 10h30 en fonction du filtre d'intensité appliqué 223
Figure 5.5 : Moyenne par filtres d'intensité dans la couverture radar des intensités moyennes de noyaux de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 à 10h30 224
Figure 5.6 : Aires moyennes par filtres d'intensité des noyaux de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 à 10h30 225
Figure 5.7 : Exemples de noyaux pluvieux de forte intensité sélectionnés et rectifiés, le 29 juillet 2005 à 10h30 227
Figure 5.8 : Exemples de noyaux pluvieux de forte intensité avec leurs centres moyens pondérés, le 29 juillet 2005 à 10h30 228
Figure 5.9 : Exemples de noyaux pluvieux de forte intensité avec leurs ellipses directionnelles, le 29 juillet 2005 à 10h30 229
Figure 5.10 : Vecteur de déplacement entre un noyau de forte intensité identifié sur deux pas de temps successifs (le 29 juillet 2005 à 17h45 puis à 17h50) 230
Figure 5.11 : Modèle d'automatisation de la chaîne de traitement (présenté en deux parties). Les numéros renvoient à la description des traitements. Les liaisons en pointillées indiquent les conditions de réalisation de l'opération. 233
Figure 5.12 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 235
Figure 5.13 : Centres moyens pondérés et vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 au dessus du territoire du Grand Lyon 236
Figure 5.14 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 237
Figure 5.15 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 239
Figure 5.16 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 240
Figure 5.17 : Moyennes des intensités moyennes (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 240
Figure 5.18 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 241
Figure 5.19 : Forme moyenne des noyaux (de 1 : arrondie à 13 : très allongée) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 242
Figure 5.20 : Rotation moyenne des noyaux (°N) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 242

Figure 5.21 : Orientation moyenne des vecteurs de déplacement des noyaux (°N) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 243
Figure 5.22 : Vitesse moyenne des noyaux (km/h) par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 09 septembre 2002 243
Figure 5.23 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « intensité moyenne » des noyaux de forte intensité du 09 septembre 2002 245
Figure 5.24 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » 245
Figure 5.25 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « forme » et « rotation » 246
Figure 5.26 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 19 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 247
Figure 5.27 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 09 septembre 2002 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 248
Figure 5.28 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 19 septembre 2002 250
Figure 5.29 : Moyennes des intensités moyennes (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode 251
Figure 5.30 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode 251
Figure 5.31 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 19 septembre 2002 252
Figure 5.32 : Orientations moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 19 septembre 2002 252
Figure 5.33 : Vitesses moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 19 septembre 2002 253
Figure 5.34 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 19 septembre 2002 254
Figure 5.35 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 23 juillet 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 255
Figure 5.36 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 23 juillet 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 256
Figure 5.37 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 23 juillet 2004 257
Figure 5.38 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 23 juillet 2004 258
Figure 5.39 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 23 juillet 2004 259
Figure 5.40 : Orientations moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 23 juillet 2004 259
Figure 5.41 : Vitesses moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 23 juillet 2004 260
Figure 5.42 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 23 juillet 2004 260
Figure 5.43 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 04 août 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 261

Figure 5.44 : Centres moyens pondérés et vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 04 août 2004 sur le territoire du Grand Lyon..... 262
Figure 5.45 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 04 août 2004 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 263
Figure 5.46 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 04 août 2004..... 264
Figure 5.47 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 04 août 2004..... 265
Figure 5.48 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 04 août 2004..... 265
Figure 5.49 : Vitesses moyennes (km/h) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 04 août 2004..... 266
Figure 5.50 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 04 août 2004..... 266
Figure 5.51 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 29 juillet 2005 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 267
Figure 5.52 : Centres moyens pondérés et vecteur de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 29 juillet 2005 sur le Grand Lyon 268
Figure 5.53 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie de forte intensité identifiés pour l'épisode du 29 juillet 2005 dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues 269
Figure 5.54 : Nombre de noyaux de forte intensité identifiés au cours de l'épisode du 29 juillet 2005..... 271
Figure 5.55 : Moyennes des intensités maximales (mm/h) par pas de temps de cinq minutes des noyaux de forte intensité au cours de l'épisode du 29 juillet 2005..... 271
Figure 5.56 : Superficies moyennes (km²) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 29 juillet 2005 272
Figure 5.57 : Orientations moyennes (°N) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 29 juillet 2005 273
Figure 5.58 : Vitesses moyennes (km/h) des noyaux par pas de temps de cinq minutes au cours de l'épisode du 29 juillet 2005 273
Figure 5.59 : Nuage de régressions entre les caractéristiques « intensité maximale » et « superficie » des noyaux de forte intensité de l'épisode du 29 juillet 2005 274
Figure 5.60 : Centres moyens pondérés des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005, dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues..... 275
Figure 5.61 : Densité des centres moyens pondérés des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005, dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues. Le territoire du Grand Lyon n'est pas la zone la plus densément touchée par les noyaux. 276
Figure 5.62 : Centres moyens pondérés et vecteurs de déplacement des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005 sur le Grand Lyon 277
Figure 5.63 : Vecteurs de déplacement des noyaux de pluie identifiés durant les cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité de la période 2001-2005, dans la zone de couverture du radar de Saint-Nizier d'Azergues..... 278
Figure 5.64 : Nuage de régression entre les intensités maximales et les superficies des 1891 noyaux de pluie de forte intensité analysés..... 282

Figure 5.65 : Intensité maximale et superficie d'un même noyau de forte intensité analysé au cours de l'épisode du 27 juillet 2005 283
Figure 5.66 : Nuage de régression entre les intensités maximales et les superficies du noyau analysé le 27 juillet 2005 284

Chapitre 3 - Partie 1

Figure 6.1 : Fiche de débordement à remplir par les agents de terrain lors de dysfonctionnement de réseau 291
Figure 6.2 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993 et débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau 293
Figure 6.3 : Hauteur d'eau cumulée de l'épisode pluvieux du 07 août 1997 et débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau 294
Figure 6.4 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 07 août 1997 et débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau 295
Figure 6.5 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 1er juillet 1993, débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau et communes victimes d'inondations d'après *le Progrès* (le journal nous renseigne en outre sur le caractère orageux de l'événement) 296
Figure 6.6 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 07 septembre 1995, débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau et communes victimes d'inondations d'après *le Progrès* (le journal nous renseigne en outre sur le caractère orageux de l'événement) 297
Figure 6.7 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 12 mai 1993, débordements associés contenus dans la base de données de la Direction de l'eau et communes victimes d'inondations d'après le Progrès (le journal nous renseigne en outre sur la présence de grêlons lors de l'événement) 298
Figure 6.8 : Causes de déplacement du SDIS liées à l'eau contenue dans la base de données fournie pour la période mi 2008-2009 299
Figure 6.9 : Hauteurs d'eau cumulées de l'épisode pluvieux du 26 juillet 2008 et débordements associés contenus dans les bases de données de la Direction de l'eau et du SDIS 300
Figure 6.10 : Débordements recensés du réseau d'assainissement du Grand Lyon (période 1988-2005) 302
Figure 6.11 : Débordements recensés par communes du Grand Lyon (période 1988-2005). 303
Figure 6.12 : Débordements recensés par superficie des communes du Grand Lyon (période 1988-2005) 303
Figure 6.13 : Débordements recensés par longueur de réseau d'assainissement par communes du Grand Lyon (période 1988-2005) 304
Figure 6.14 : Densité de débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon (période 1988-2005) 305
Figure 6.15 : Répartition temporelle annuelle des débordements du réseau d'assainissement du Grand Lyon (période 1988-2005) 306
Figure 6.16 : Typologie des pluies à l'origine des débordements : remarquables en termes d'intensité, de durée, de hauteur d'eau précipitée ou ordinaires 310
Figure 6.17 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes d'intensité 311
Figure 6.17 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes d'intensité 312

Figure 6.18 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée 313
Figure 6.18 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée 313
Figure 6.19 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de durée 314
Figure 6.19 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies remarquables en termes de durée 314
Figure 6.20 a : Débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies ordinaires 316
Figure 6.20 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement provoqués des pluies ordinaires 316
Figure 6.21 : Hauteur d'eau précipitée lors de l'épisode du 19 juillet 2004 et débordements associés 317
Figure 6.22 : Avaloir complètement obstrué par des feuilles et de la terre (à gauche) puis sommairement dégagé (à droite), sur le domaine universitaire de la Doua, Villeurbanne (cliché : D. Granger (Granger, 2009)) 317
Figure 6.23 : Etude du risque lié aux pluies ordinaires sur le Grand Lyon 318
Figure 6.24 : Origine des débordements en fonction du type de réseau 319
Figure 6.25 : Ratio de débordements par type et longueur de réseau d'assainissement 320
Figure 6.26 a : Débordements du réseau d'assainissement unitaire 321
Figure 6.26 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement unitaire 321
Figure 6.27 a : Débordements du réseau d'assainissement pluvial 322
Figure 6.27 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement pluvial 322
Figure 6.28 a: Débordements du réseau d'assainissement d'eau usée 323
Figure 6.28 b: Densité de débordements du réseau d'assainissement d'eau usée 323
Figure 6.29 a : Débordements survenus lors d'une absence du réseau d'assainissement 324
Figure 6.29 b : Densité de débordements survenus lors d'une absence du réseau d'assainissement 324
Figure 6.30 : Origine des débordements en fonction de la nature des éléments constitutifs du réseau d'assainissement 325
Figure 6.31 a: Débordements du réseau d'assainissement liés aux bouches d'égouts et aux avaloirs 326
Figure 6.31 b: Densité de débordements du réseau d'assainissement liés aux bouches d'égouts et aux avaloirs 327
Figure 6.32 a : Débordements du réseau d'assainissement liés aux canalisations 327
Figure 6.32 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement liés aux canalisations 328
Figure 6.33 a : Débordements du réseau d'assainissement liés aux puits d'infiltration 328
Figure 6.33 b : Densité de débordements du réseau d'assainissement liés aux puits d'infiltration 329
Figure 6.34 : Débordements provoqués par des pluies remarquables en termes d'intensité moyenne en 18 minutes et débordements liés aux avaloirs / bouches d'égouts. Les triangles correspondent aux débordements liés à la pluie intense, et les ronds correspondent à ceux liés aux avaloirs. Les points sélectionnés en bleu répondent aux débordements d'avaloirs provoqués par des pluies remarquablement intenses (34,5% des débordements totaux d'avaloirs) 330
Figure 6.35 : schéma de fonctionnement simplifié de la démarche de modélisation du réseau d'assainissement (source : Direction de l'eau, 2009) 335
Figure 6.36 : Bassin versant du Grand Lyon, réseau d'assainissement, stations d'épuration et réseau structurant modélisé avec *Canoe* 336

Figure 6.37 : Exemple de mise en charge du réseau qui se traduit par un débordement au niveau du tampon (source : Caradot et al., 2010a) 338
Figure 6.38 : Débordements observés et simulés, et hauteur d'eau dans le réseau pour la pluie du 10 juin 2000 sur le bassin versant modélisé de Neuville 339
Figure 6.39 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 04 août 2004, et zones de densité de débordements associés 341
Figure 6.40 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 07 septembre 1995, et zones de densité de débordements associés 342
Figure 6.41 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 07 août 1997, et zones de densité de débordements associés 343
Figure 6.42 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 10 juin 2000, et zones de densité de débordements associés 343
Figure 6.43 : Débordements observés (à gauche) et modélisés (à droite) de l'épisode pluvieux du 30 juin 1997, et zones de densité de débordements associés 344

Chapitre 3 - Partie 2

Figure 7.1 : Estimation de la vulnérabilité du SEPAL (Syndicat Mixte d'Etudes et de Programmation de l'Agglomération Lyonnaise) ; source : agence d'urbanisme pour le développement de l'agglomération lyonnaise (2005). D'après le SEPAL, les secteurs de forte vulnérabilité se situeraient dans l'est et dans le sud de l'agglomération 351
Figure 7.2 : Carte des enjeux situés en lit majeur dans le « coeur urbain » au début du XXIe siècle (source : Combe, 2007) 353
Figure 7. 3 : Décomposition hiérarchique généralisée du système spatial de la vulnérabilité lyonnaise 363
Figure 7. 4 : Priorités relatives contenues dans la fonction de vulnérabilité globale, et dans les fonctions de potentiel stratégique et de sensibilité 371
Figure 7. 5 : Priorités relatives contenues dans la fonction de potentiel stratégique des bâtiments selon leurs activités 372
Figure 7. 6 : Exemple de carroyage à maille carrée de côté de 500m et de 100m, centré sur le 5ème arrondissement de Lyon 374
Figure 7. 7 : Exemple de conversion d'enjeux représentés respectivement sous forme surfacique (espaces agricole), linéaire (réseau d'assainissement) et ponctuelle (arbres d'alignement) à une forme maillée, centré sur le 5ème arrondissement de Lyon 376
Figure 7. 8 : Sensibilité globale des enjeux du Grand Lyon 378
Figure 7. 9 : Importance stratégique globale des enjeux du Grand Lyon 378
Figure 7. 10 : Vulnérabilité humaine du Grand Lyon 379
Figure 7. 11 : Vulnérabilité matérielle du Grand Lyon 379
Figure 7. 12 : Vulnérabilité environnementale du Grand Lyon 380
Figure 7. 13 : Vulnérabilité globale du Grand Lyon 380
Figure 7. 14 : Risque de submersion par une crue du Rhône ou de la Saône (zonage des zones submersibles issu du PLU du Grand Lyon) 383
Figure 7. 15 : Risque de ruissellement (zonage des zones exposées (basse ou de passage) issu du PLU du Grand Lyon) 384

Liste des tableaux

Une nouvelle numérotation de tableaux est effectuée pour chacune des parties du texte.

Chapitre 1 - Partie 1

Tableau 2.1 : Critères de classification des sites (WMO, 2008) 47
Tableau 2.2 : Caractéristiques des campagnes des comparaisons de mesure de précipitations de l'OMM (adapté de Sevruk et al., 2006) 55
Tableau 2.3 : Caractéristiques des types de pluviomètres testés par l'OMM en laboratoire lors de la comparaison sur la mesure des intensités Iva (adapté de Lanza et al., 2005) (* : HMEI est une association dénommée « Hydro-Meteorological Equipment Industry » qui regroupe des fabricants d'appareils de mesure du monde entier). 56
Tableau 2.4 : Caractéristiques des types de pluviomètres testés par l'OMM sur le terrain lors de la comparaison sur la mesure des intensités IVb (adapté de Vuerich et al., 2009a). 59
Tableau 2.5 : Coordonnées Lambert zone II (km), altitudes NGF (m), sites, propriétaires et dates de fonctionnement des pluviomètres du Grand Lyon 65
Tableau 2.6a : Distances (en km) entre les pluviomètres opérationnels du Grand Lyon (en rouge et en bleu respectivement les postes voisins les plus éloignés et les plus proches) 67
Tableau 2.6b : Distances (en km) entre les pluviomètres opérationnels du Grand Lyon (en rouge et en bleu respectivement les postes voisins les plus éloignés et les plus proches) 67
Tableau 2.7 : Exemples de cumuls annuels (en mm) sans dysfonctionnement pour les pluviomètres de Bron du Grand Lyon et de Météo-France 69
Tableau 2.8 : Erreur d'estimation moyenne globale et écart type obtenus par validation croisée sur les cumuls annuels du Grand Lyon pour chaque méthode d'interpolation 94
Tableau 2.9 : Erreur d'estimation moyenne globale et écart type en mm, obtenus par validation croisée sur les cumuls des événements pluvieux intenses pour chaque méthode d'interpolation 95
Tableau 2.10 : Erreur d'estimation moyenne globale et écart type en mm, obtenus par validation croisée sur les hauteurs d'eau à faible pas de temps de l'épisode du 29 juin 1993. 96

Chapitre 1 - Partie 2

Tableau 3.1 : Cumuls moyens annuels (mm - période 1988 – 2008) 107
Tableau 3.2 : Nombre de pluies annuelles d'après les critères de sélection utilisés 109
Tableau 3.3 : Dates et cumuls moyens (mm) des 25 pluies les plus remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée de la période 1988-2005 111
Tableau 3.4 : Dates et durée (h) des 25 pluies les plus remarquables en termes de durée de la période 1988-2005. Les dates en rouges sont communes avec les pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée 112
Tableau 3.5 : Dates et intensité maximale moyenne en 18 minutes (mm/h) des 25 pluies les plus remarquables en termes d'intensité maximale moyenne en 18 minutes de la période 1988-2005 112

Tableau 3.6 : Zones de l'agglomération les plus arrosées durant les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée. 118
Tableau 3.7 : Proportion des zones de l'agglomération les plus arrosées (%) durant les épisodes remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée. 118
Tableau 3.8 : Zones de l'agglomération les plus arrosées durant les épisodes remarquables en termes de durée. 119
Tableau 3.9 : Proportion des zones de l'agglomération les plus arrosées (%) durant les épisodes remarquables en termes de durée. 120
Tableau 3.10 : Zones de l'agglomération les plus arrosées durant les épisodes remarquables en termes d'intensité maximale en 18 minutes 122
Tableau 3.11 : Proportion des zones de l'agglomération les plus arrosées (%) durant les épisodes remarquables en termes d'intensité maximale en 18 minutes 122
Tableau 3.12 : Déploiement préférentiel des épisodes remarquables en termes de hauteur totale d'eau précipitée 129
Tableau 3.13 : Déploiement préférentiel des épisodes remarquables en termes de durée 130
Tableau 3.14 : Déploiement préférentiel des épisodes remarquables en termes d'intensité maximale moyenne en 18 minutes 130
Tableau 3.15 : Caractéristiques privilégiées des déploiements préférentiels des épisodes remarquables 131
Tableau 3.16 : Trajectoires des épisodes remarquables identifiées à l'aide des interpolations spatiales à pas de temps fin 134

Chapitre 2 - Partie 1

Tableau 4.1 : Fréquence et longueur d'ondes des différents types de radar (WMO, 2008) .. 142
Tableau 4.2 : Coordonnées du radar de Satolas 149
Tableau 4.3 : Coordonnées du radar de Saint-Nizier d'Azergues 151
Tableau 4.4 : Caractéristiques techniques du radar de Saint-Nizier d'Azergues (source : fourni par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France) 153
Tableau 4.5 : Correspondance entre niveau de digitalisation radar et intensité de pluie, d'après la relation de Marshall-Palmer, 1948 (Faure, 2008) 154
Tableau 4.6 : Correspondance entre niveau de digitalisation radar et intensité de pluie (source : fourni par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France) 155
Tableau 4.7 : Facteurs correctifs de lames d'eau (fournis par la Division Interrégionale Centre Est (DIRCE) de Météo-France, 2008) Ke = facteur correctif : coefficient effectivement appliqué aux données de lames d'eau archivées 159
Kr et Kc = coefficient correctif réduit et complet : valeurs finales des facteurs recommandés par Météo-France pour une utilisation en temps différé, selon le type de réseau pluviométrique utilisé (réduit (Kr) puis complet (Kc)) 159
Tableau 4.8 : Echantillon de journées radar correspondant aux 17 épisodes pluvieux remarquables de la période 2001-2006 179
Tableau 4.9 : Coordonnées (Lambert zone II, mètres) du coin haut gauche des pixels radar dont la qualité de mesure hydrologique est jugée peu fiable 185
Tableau 4.10 : Moyenne (mm) des cumuls des épisodes pluvieux de la sélection par le réseau pluviométrique et le radar météorologique (valeurs de réflectivité instantanée et de lames d'eau au sol), et présence de bandes brillantes 195
Tableau 4.11 : Facteurs de remise à niveau globale (facteur correctif), fondés sur les pluviomètres du Grand Lyon et spécifiques à chacun des épisodes, à affecter aux deux types de données radars 196

Tableau 4.12 : Comparaison ponctuelle de la valeur du pluviomètre à celle du pixel radar pour l'épisode pluvieux du 1er mai 2002 (pour l'ensemble des pluviomètres fonctionnels à cette date) 198
Tableau 4.13 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau ou réflectivité radar pour l'ensemble des épisodes pluvieux de l'échantillon 199
Tableau 4.14 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau radar, pour les épisodes remarquables en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes 199
Tableau 4.15 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau radar, pour les épisodes remarquables en termes de hauteur totale moyenne précipitée 199
Tableau 4.16 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau radar, pour les épisodes remarquables en termes de durée 199
Tableau 4.17 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et réflectivité radar, pour les épisodes remarquables en termes d'intensité moyenne maximale en 18 minutes 200
Tableau 4.18 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et réflectivité radar, pour les épisodes remarquables en termes de hauteur totale moyenne précipitée 200
Tableau 4.19 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et réflectivité radar, pour les épisodes remarquables en termes de durée 200
Tableau 4.20 : Ecarts moyens absolus et relatifs entre pluviomètres et lames d'eau ou réflectivité radar, en fonction du type d'épisodes pluvieux remarquables considérés (remarquables en termes d'intensité, de hauteur totale d'eau précipitée ou de durée) 201
Tableau 4.21 : Ecart relatif moyen (%) entre les estimations des lames d'eau radars et les mesures au sol 206
Tableau 4.22 : Distance rectilinéaire (mm) issue de la validation croisée, après interpolation par krigeage et cokrigeage, entre les valeurs observées et les valeurs estimées pour les 17 pluies de l'échantillon 208

Chapitre 2 - Partie 2

Tableau 5.1 : Pas de temps retenus pour l'analyse de sensibilité 221
Tableau 5.2 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 09 septembre 2002 239
Tableau 5.3 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 19 septembre 2002 249
Tableau 5.4 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 23 juillet 2004 257
Tableau 5.5 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 04 août 2004 264
Tableau 5.6 : Caractéristiques des noyaux de pluie de forte intensité identifiés le 29 juillet 2005 270
Tableau 5.7 : Caractéristiques moyennes des cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité en 18 minutes, de la période 2001-2005 280
Tableau 5.8 : Caractéristiques maximales des cinq épisodes les plus remarquables en termes d'intensité en 18 minutes, de la période 2001-2005 280
Tableau 5.9 : Intensités maximales pour les cinq épisodes de l'échantillon mesurées avec le radar météorologique et le réseau pluviométrique sur le Grand Lyon 281
Tableau 5.10 : Coefficients de détermination issus des nuages de régression entre les intensités maximales et les superficies des noyaux de pluie de forte intensité 282

Chapitre 3 - Partie 1

Tableau 6.1 : Sélection de pluies remarquables en termes d'intensité et occurrences de débordements 307
Tableau 6.2 : Sélection de pluies remarquables en termes de hauteur d'eau précipitée et occurrences de débordements..... 308
Tableau 6.3 : Sélection de pluies remarquables en termes de durée et occurrences de débordements 308
Tableau 6.4 : Sélection de pluies ordinaires (ne figurant pas dans la liste des pluies remarquables) mais durant lesquelles des débordements ont été constatés 309
Tableau 6.5 : Débordements de types d'éléments du réseau en fonction du type de pluies considérées (%). Par exemple, 34,5 % des débordements liés à des avaloirs / bouches d'égouts l'ont été durant des pluies intenses (la légende qualitative de rouge clair à rouge foncé représente respectivement une faible densité de débordement à une forte densité)..... 331

Chapitre 3 - Partie 2

Tableau 7.1 : Les différentes problématiques de l'aide multicritère (Adapté de Roy, 1985) 357
Tableau 7.2 : Avantages et inconvénients des principales méthodes de pondération utilisables lors de l'analyse multicritère (adapté de Cherqui, 2005) 360
Tableau 7.3 : Echelle de comparaison binaire (adaptée de Saaty, 1993 et de Griot, 2003)... 368
Tableau 7.4 : Exemple de comparaison d'enjeux d'un même niveau de la décomposition hiérarchique. Les experts comparent relativement la sensibilité (puis le potentiel stratégique) de l'enjeu e_1 de la première ligne aux enjeux e_2, e_3, … , e_n qui figurent successivement en tête de chacune des colonnes. Cette opération est ensuite effectuée pour chacun des enjeux de chacune des lignes de la matrice. Il est nécessaire de ne comparer que la partie supérieure du tableau (la partie inférieure contient les résultats réciproques). 368

Annexes

Annexe 1 : Photos des pluviomètres du réseau de mesure du Grand Lyon

Pluviomètres	X	Y	Z
St Germain	791,604	101,802	171,8
Montanay	797,141	101,190	100,9
Neuville	794,245	99,515	168,7
Poleymieux	791,310	98,440	421,0
Couzon	793,840	97,110	168,2
Cailloux	797,853	97,476	259,9
Rilleux	798,031	93,909	271,0
Collonges	795,165	93,815	167,8
Limonest	788,670	95,560	358,2
Champagne	789,865	91,460	286,0
Salvagny	784,625	93,370	340,4
Crépieux	798,880	92,600	174,0
Insa	797,330	90,270	169,2
Meyzieu	806,700	91,400	187,7
Jonage	809,900	92,000	185,2
Genas	807,875	86,385	230,2
Villeurbanne	800,865	86,710	186,7
Bron	802,905	83,610	200,1
Loyasse	792,660	87,727	293,2
Battière	790,125	86,280	270,7
Bollier	794,181	84,594	163,8
Pressin	790,200	81,700	260,4
St Priest	801,140	80,895	198,4
Mions	804,320	75,750	223,2
Corbas	800,791	77,828	200,3
Sérézin	794,230	74,620	165,7
Ste Consorce	783,590	89,013	357,3
St Fons	795,524	79,929	167,9
St Genis	791,135	77,040	270,7
Pierre Bénite	795,524	79,929	163,7
Solaize	794,230	74,620	160,6
Tête d'Or	795,990	89,074	167,2

Coordonnées Lambert zone II (km), altitudes NGF (m) des pluviomètres

(Photographie Unité Etudes générales et modélisation - Service études – Direction de l'eau)

- *Saint-Germain : site fermé au public (station d'épuration)*

- *Montanay : site fermé au public (bassin de rétention/infiltration)*

- *Neuville : site fermé au public (station d'épuration)*

- *Poleymieux : site fermé au public (réservoir de Planchamp)*

- *Couzon : site fermé au public (station d'épuration)*

- *Cailloux : site fermé au public (bassin de rétention)*

- *Rillieux : site ouvert au public (complexe sportif)*

- *Collonges : site ouvert au public (complexe sportif)*

- *Limonest : Site ouvert au public (lycée agricole)*

- *Champagne : site fermé au public en dehors des heures d'ouverture (déchetterie)*

- *Salvagny : site protégé par grillage, ouvert au public*

- *Crépieux : site fermé au public (station de relevage des eaux)*

- *INSA : site protégé par grillage, ouvert au public*

- *Meyzieu : site fermé au public (toit de la station d'épuration)*

- *Jonage : site fermé au public (station d'épuration)*

- *Genas : site fermé au public (déchetterie)*

- *Villeurbanne : site fermé au public (subdivision de la Direction de l'eau)*

- *Bron : site fermé au public (aéroport)*

- *Loyasse : site ouvert au public (cimetière)*

- *Battière : site ouvert au public, protégé par un grillage (gymnase)*

- *Bollier : site fermé au public (subdivision de la Direction de l'eau)*

- *Pressin : site ouvert au public (centre privé d'enseignement agricole)*

- *Saint-Priest : site fermé au public (subdivision de la Direction de l'eau)*

- *Mions : site fermé au public (station de pompage)*

- *Corbas : site fermé au public (bassin de rétention)*

- *Sérézin : site fermé au public (station de relèvement)*

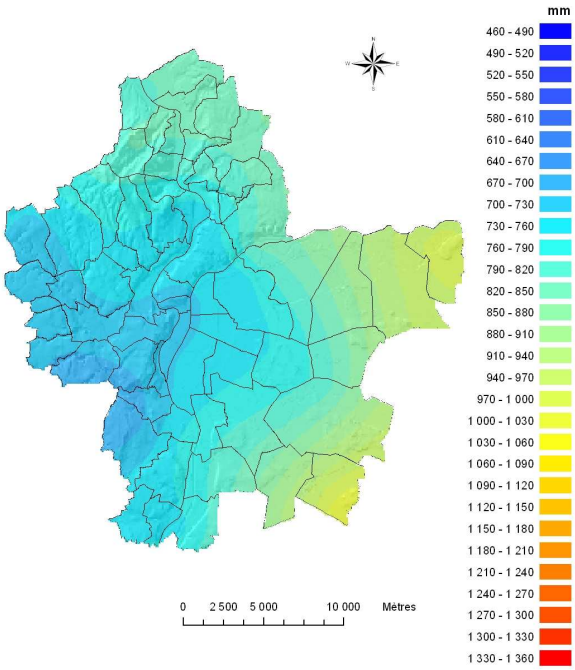
- *Sainte-Consorce : site en propriété privé (protégé par un grillage)*

- *Saint-Fons : site fermé au public (station d'épuration)*

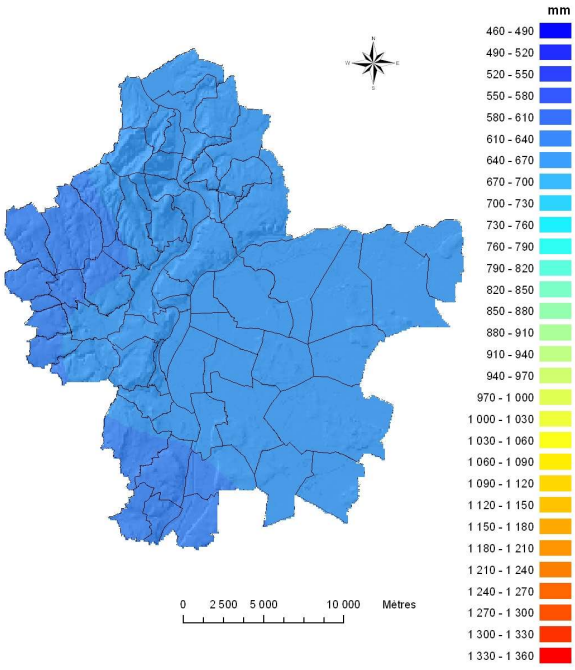
- *Saint-Genis : site ouvert au public (lycée agricole)*

Annexe 2 : Hauteurs d'eau annuelles spatialisées (krigeage ordinaire)

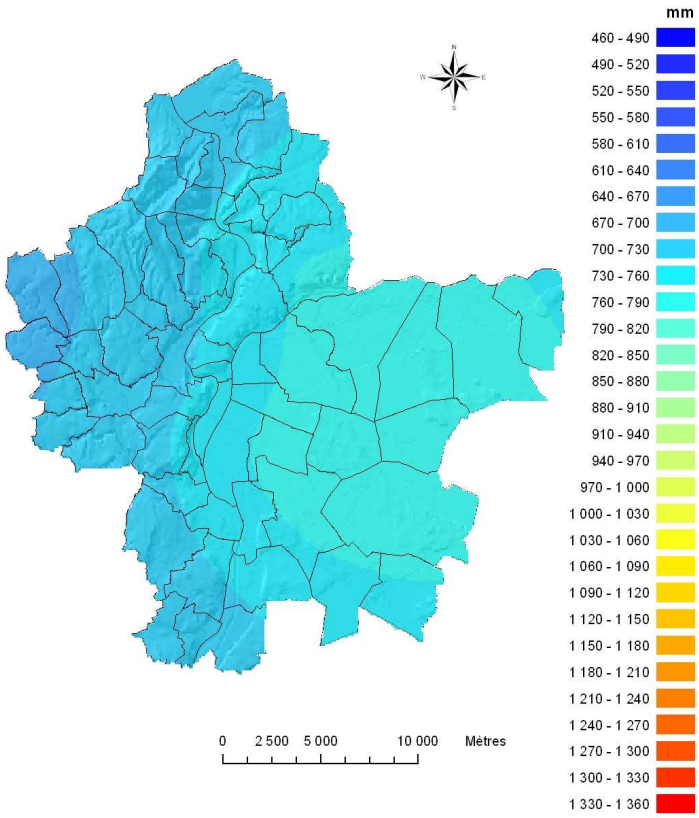
1988



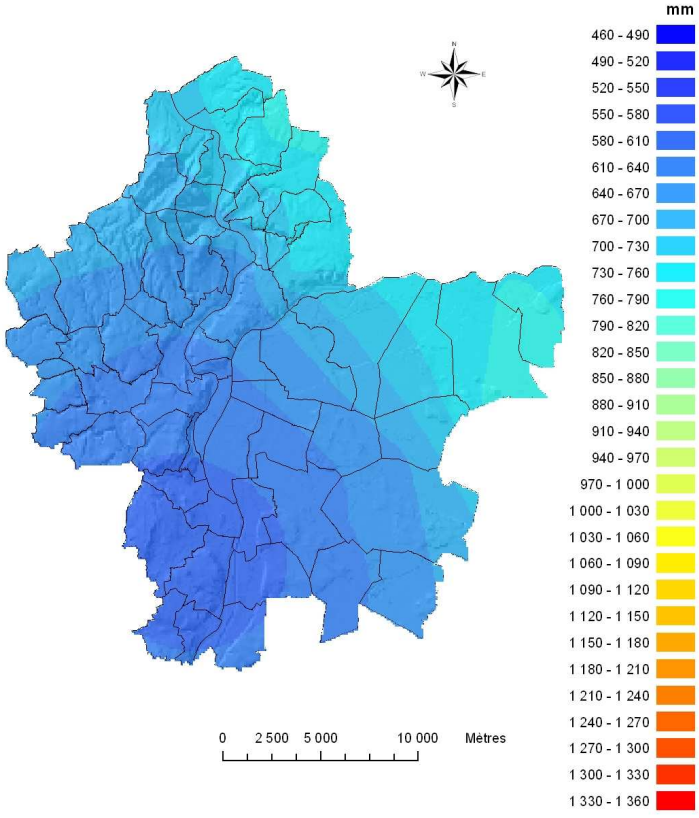
1989



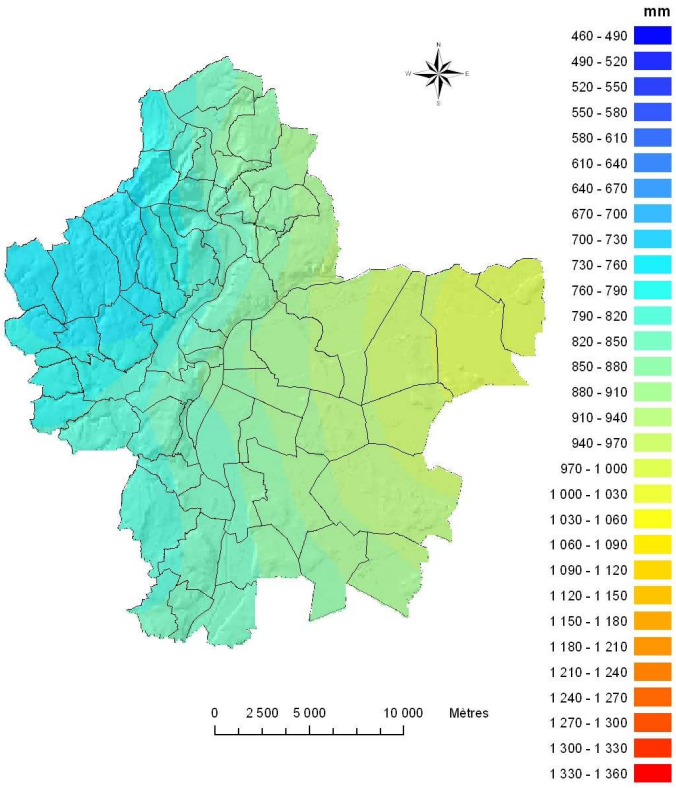
1990


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

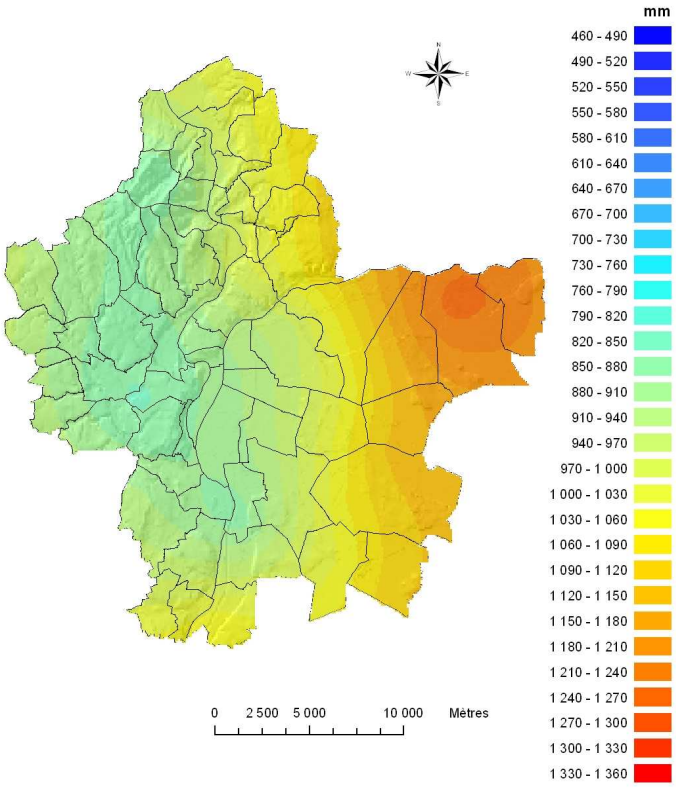
1991


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

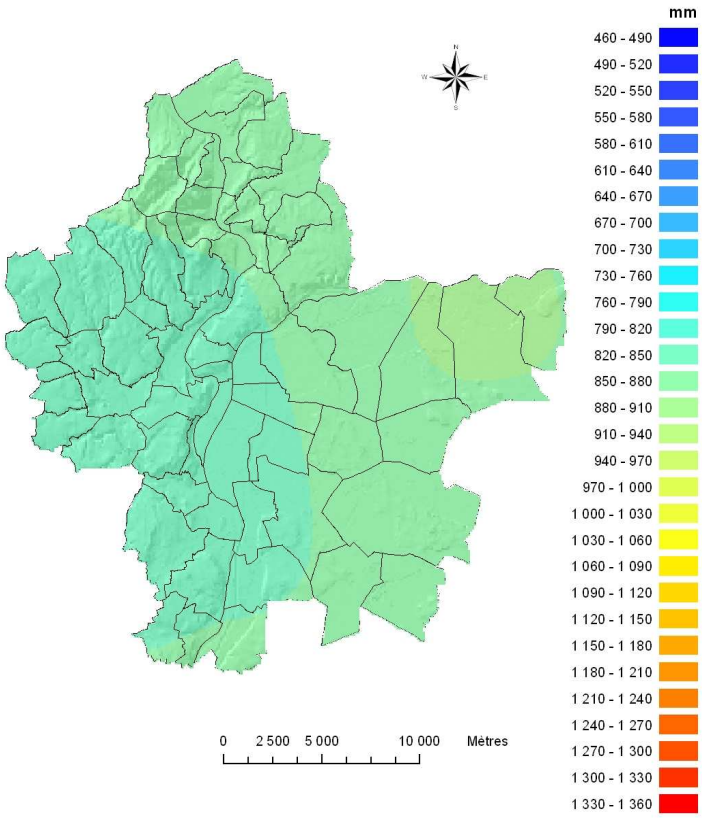
1992


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

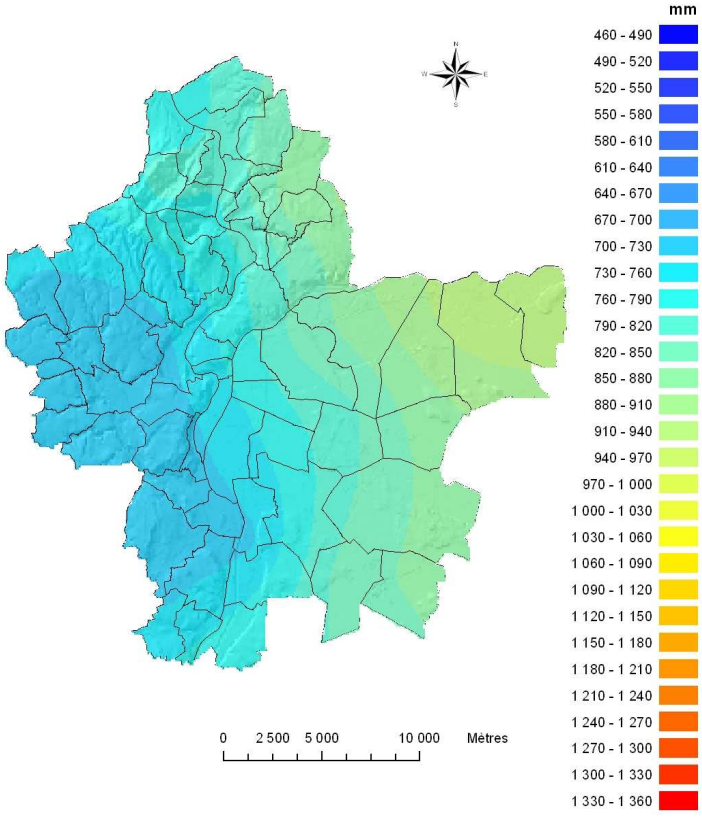
1993


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

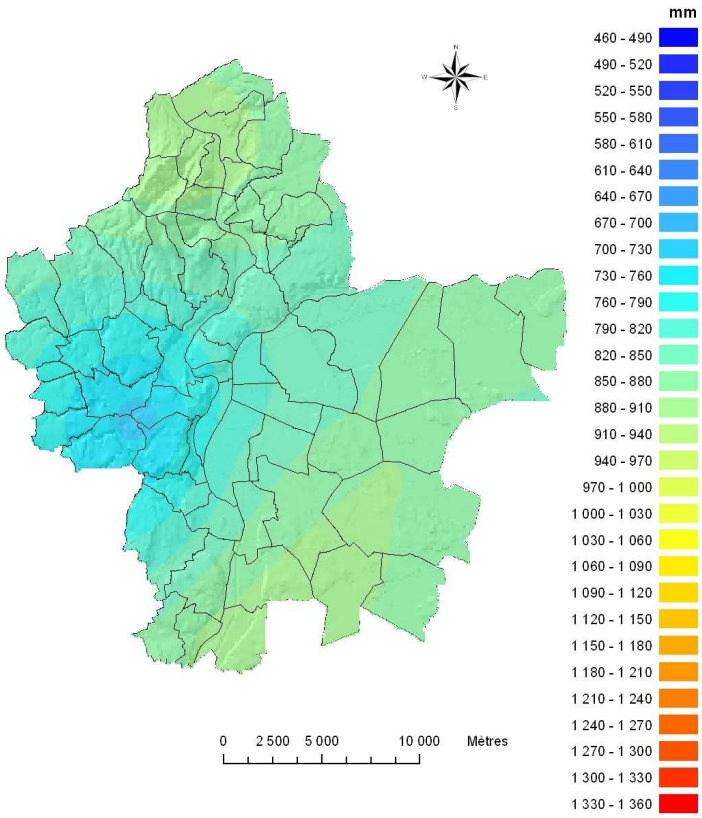
1994


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

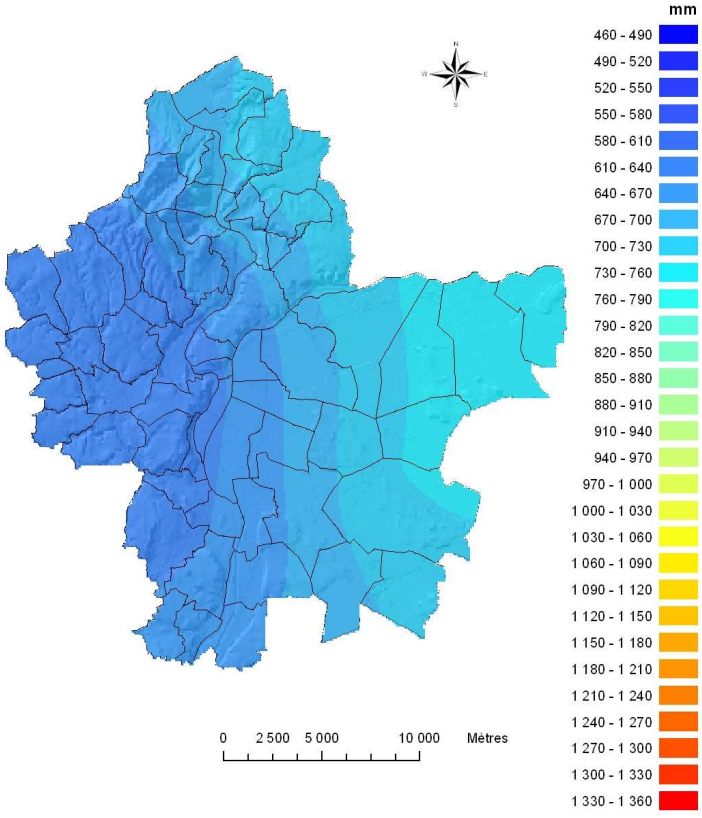
1995


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

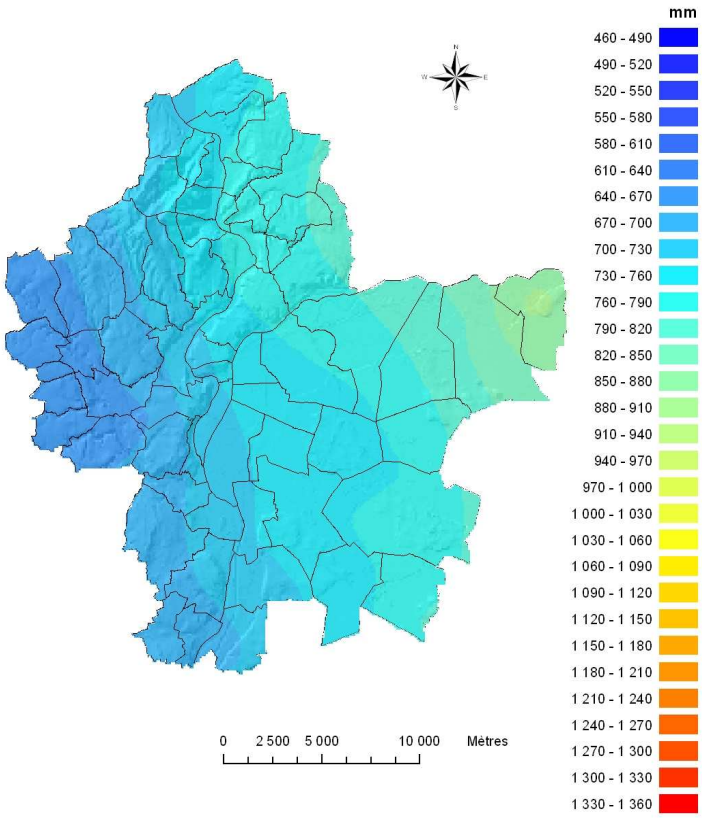
1996


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

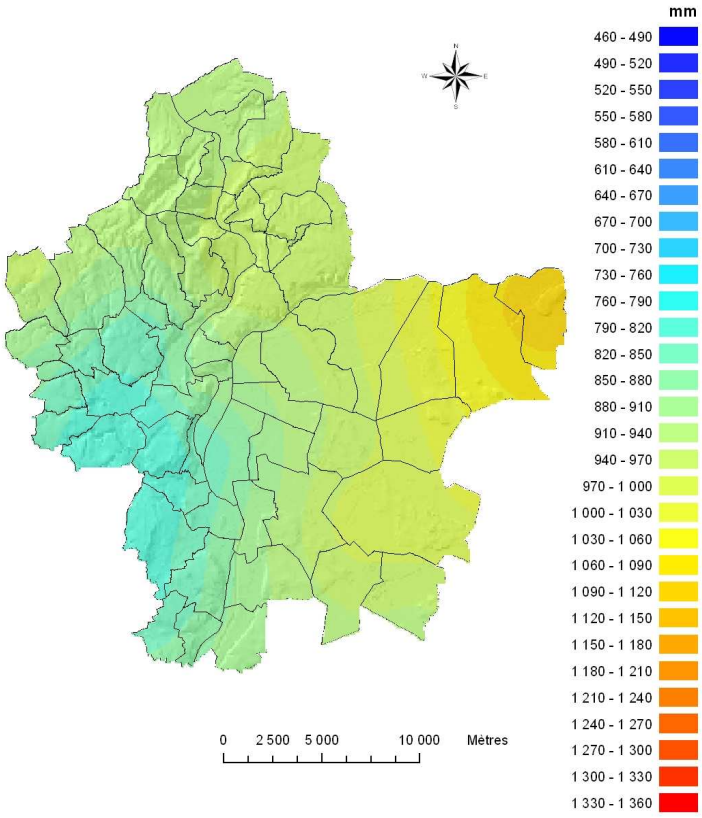
1997


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

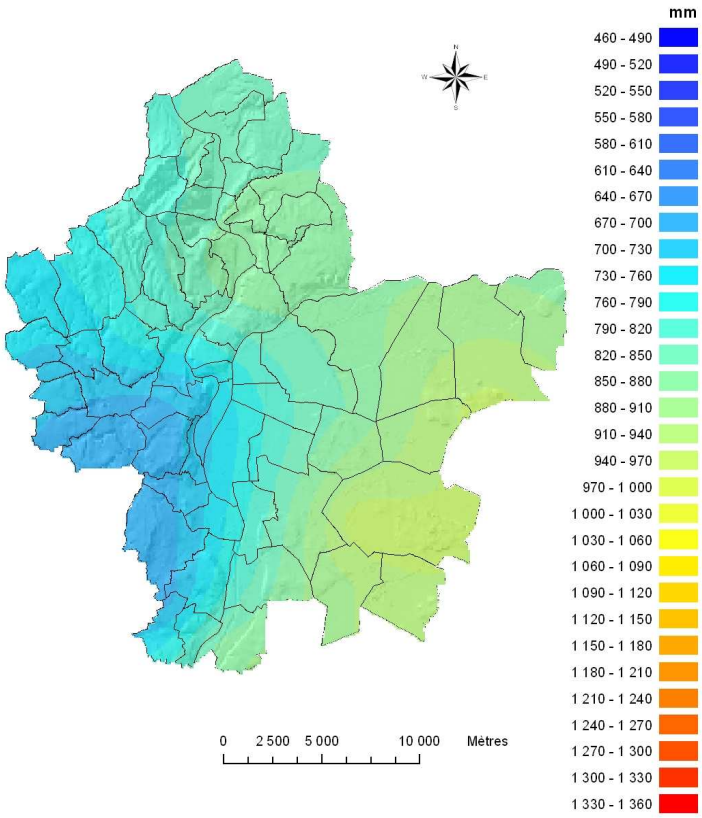
1998


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

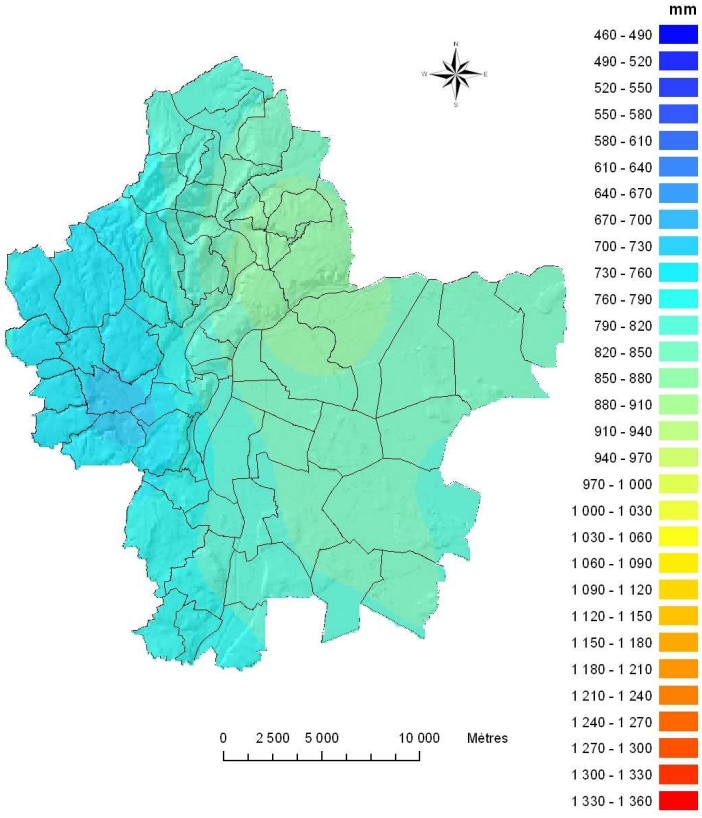
1999


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

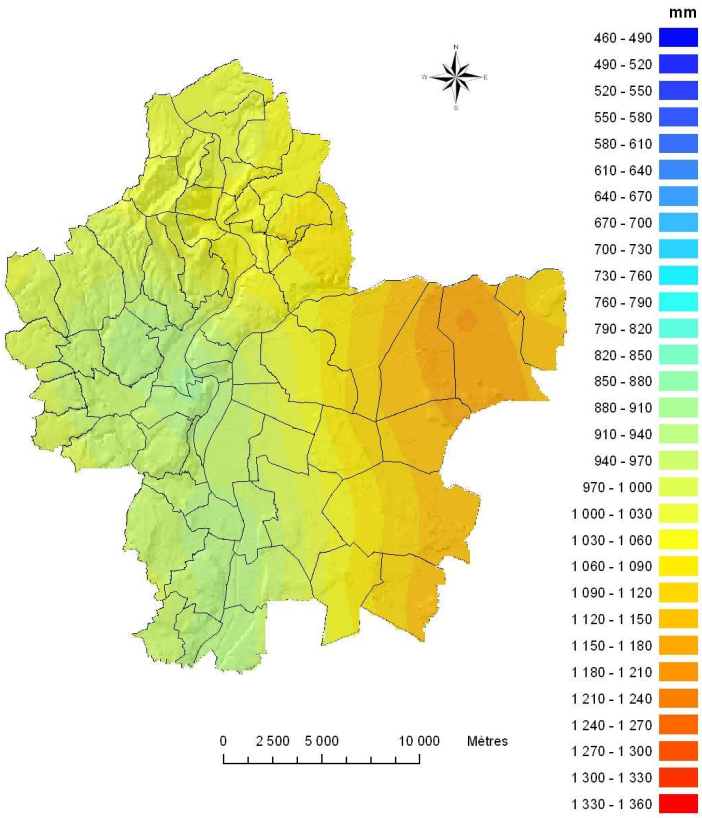
2000


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

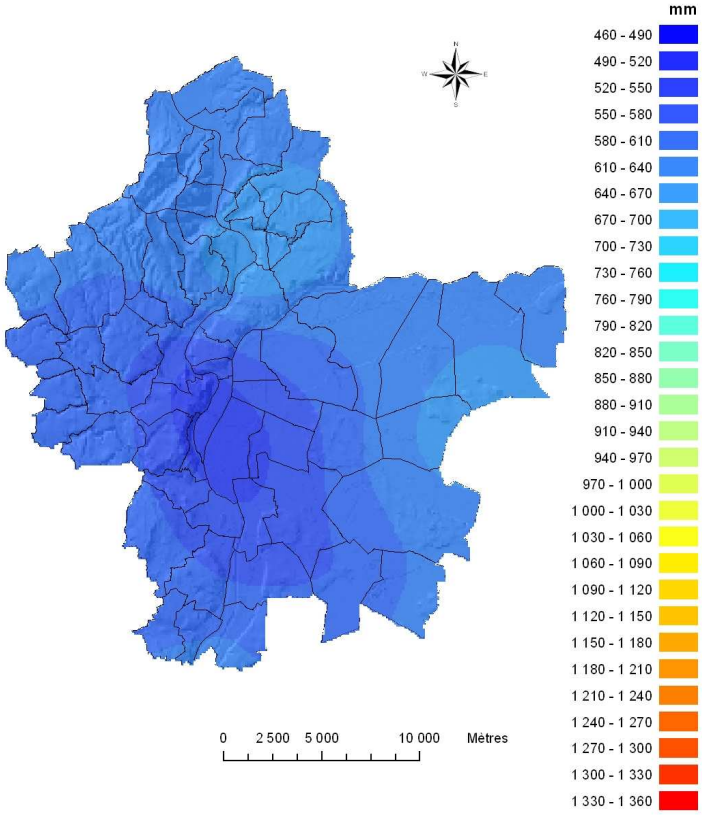
2001


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

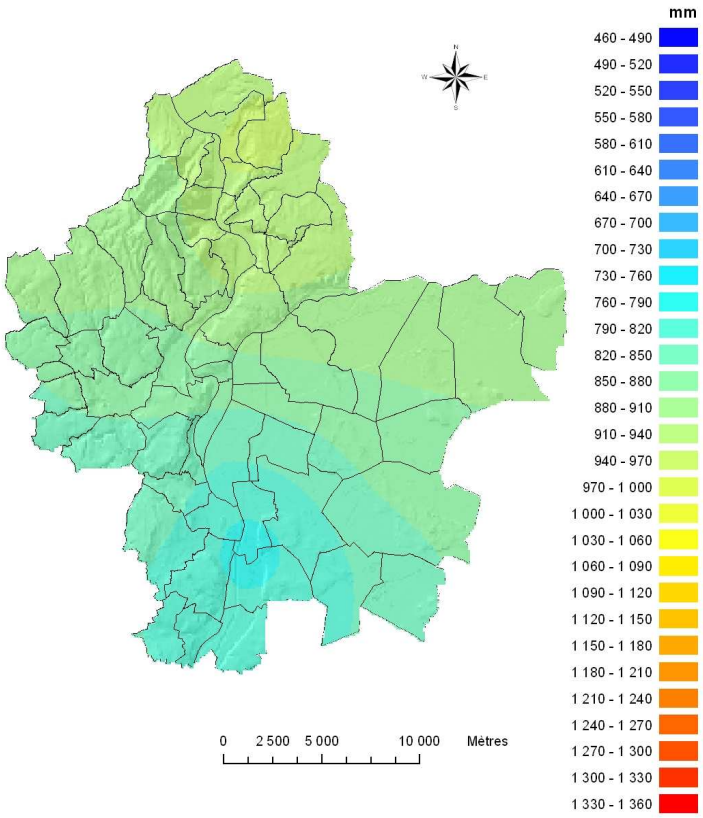
2002


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

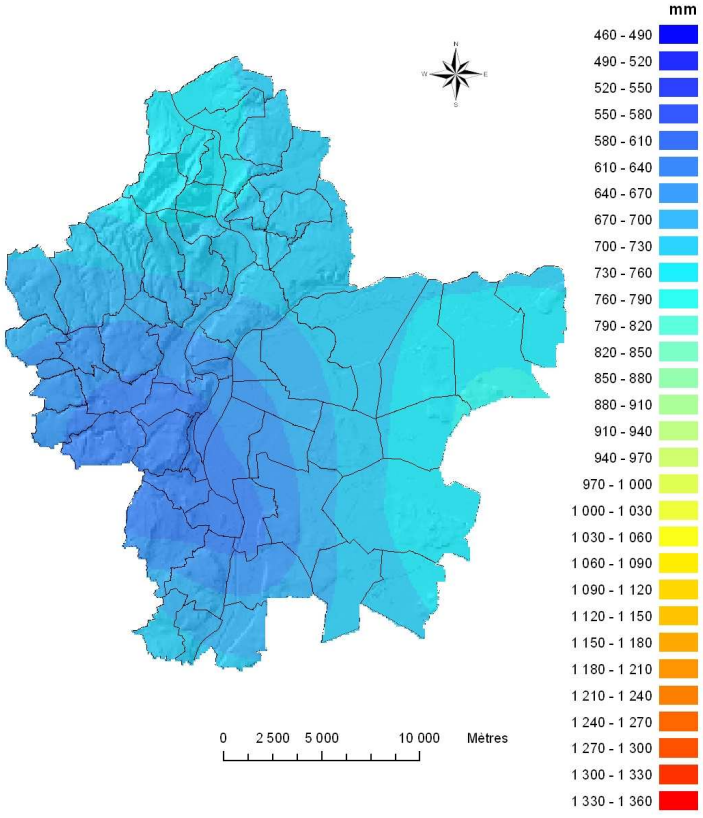
2003


mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

2004

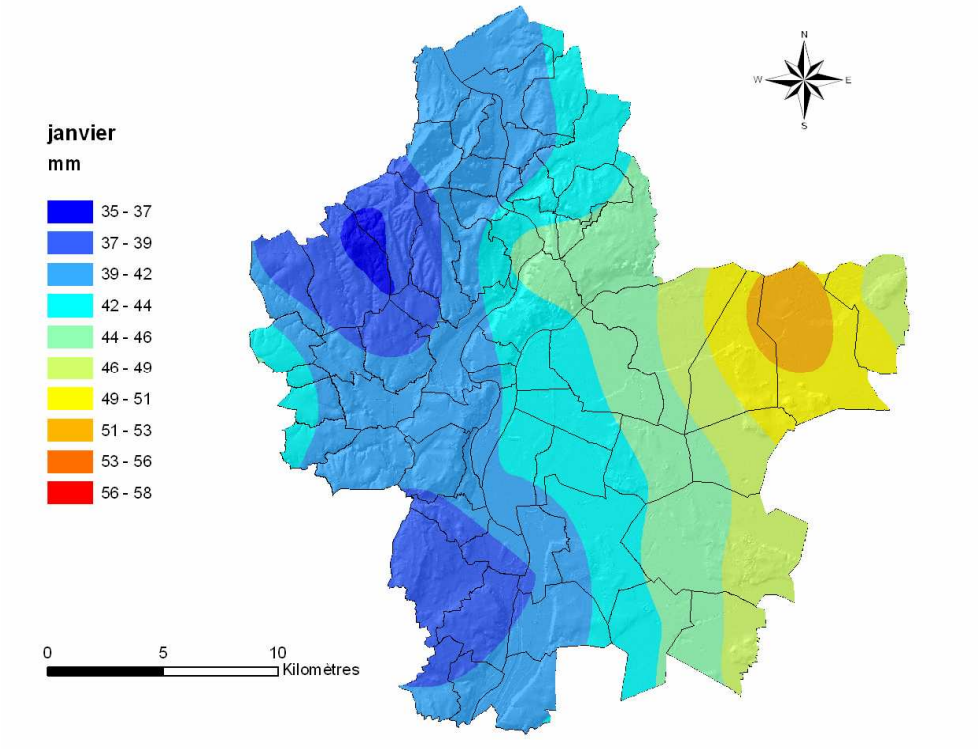

mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

2005

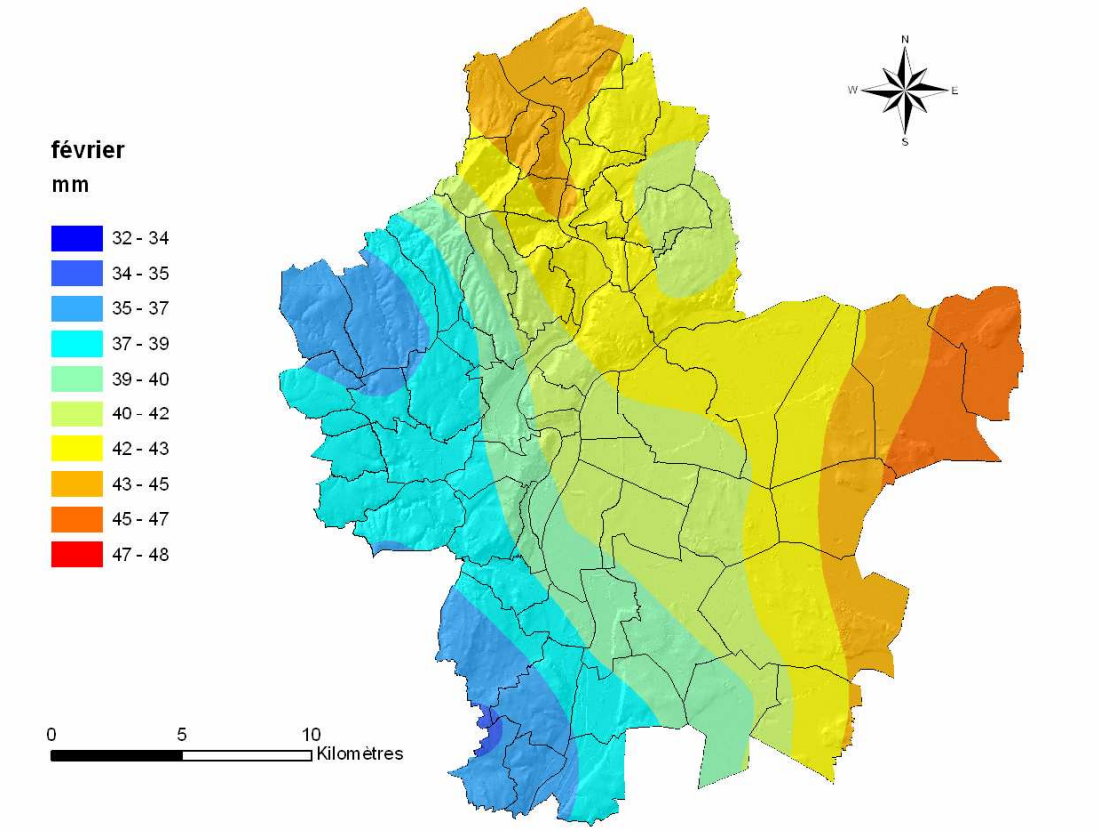

mm
460 - 490
490 - 520
520 - 550
550 - 580
580 - 610
610 - 640
640 - 670
670 - 700
700 - 730
730 - 760
760 - 790
790 - 820
820 - 850
850 - 880
880 - 910
910 - 940
940 - 970
970 - 1 000
1 000 - 1 030
1 030 - 1 060
1 060 - 1 090
1 090 - 1 120
1 120 - 1 150
1 150 - 1 180
1 180 - 1 210
1 210 - 1 240
1 240 - 1 270
1 270 - 1 300
1 300 - 1 330
1 330 - 1 360
0 2 500 5 000 10 000 Mètres

Annexe 3 : Hauteurs d'eau moyennes mensuelles spatialisées (krigeage ordinaire – période 1988 - 2005)

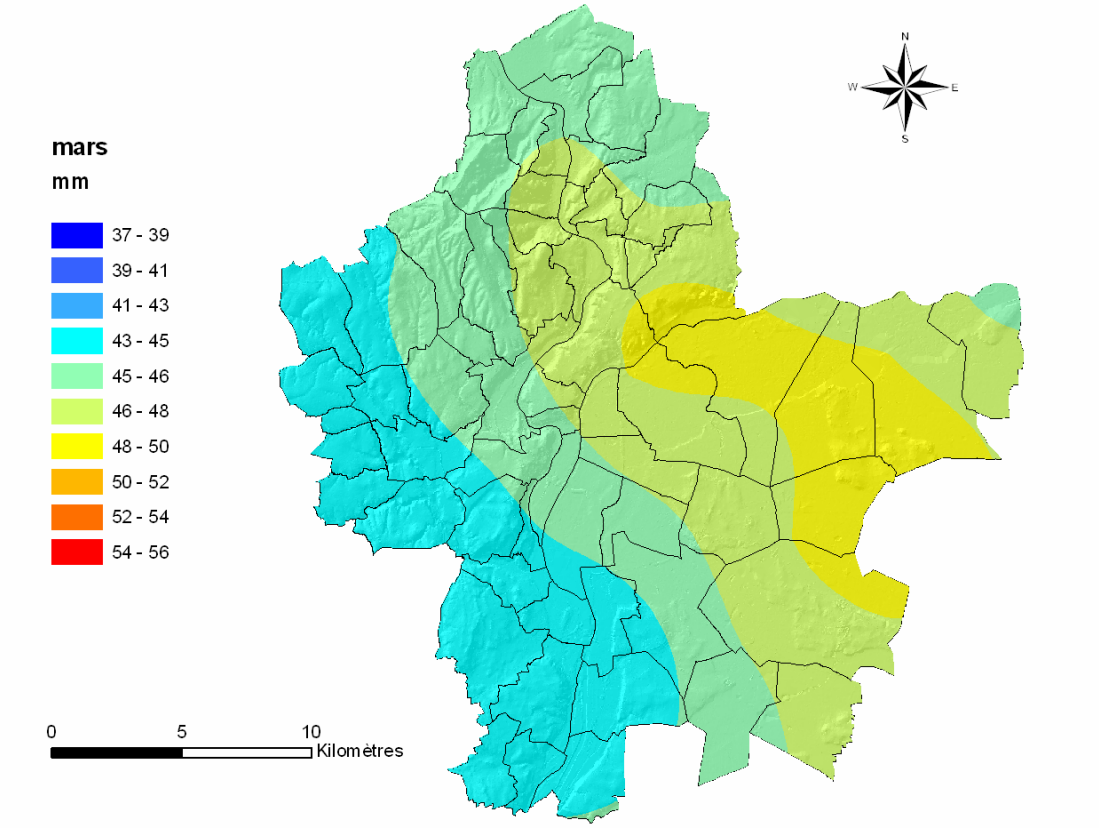
Janvier :



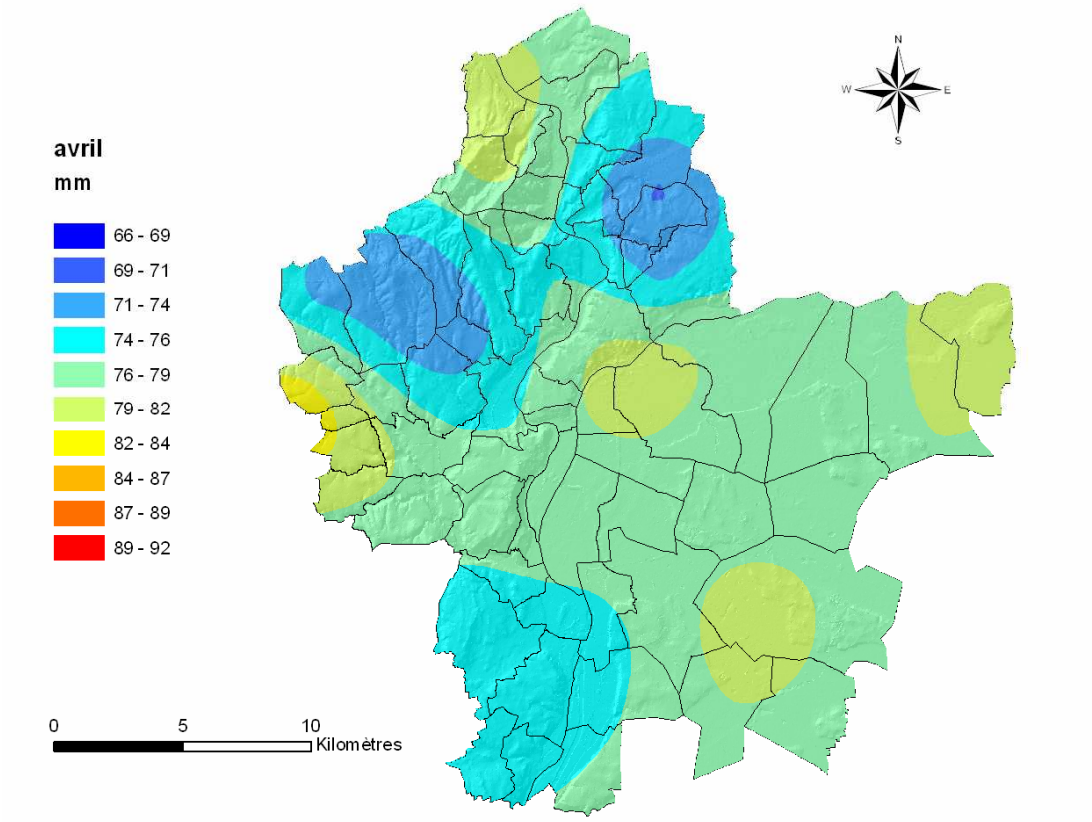
Février :



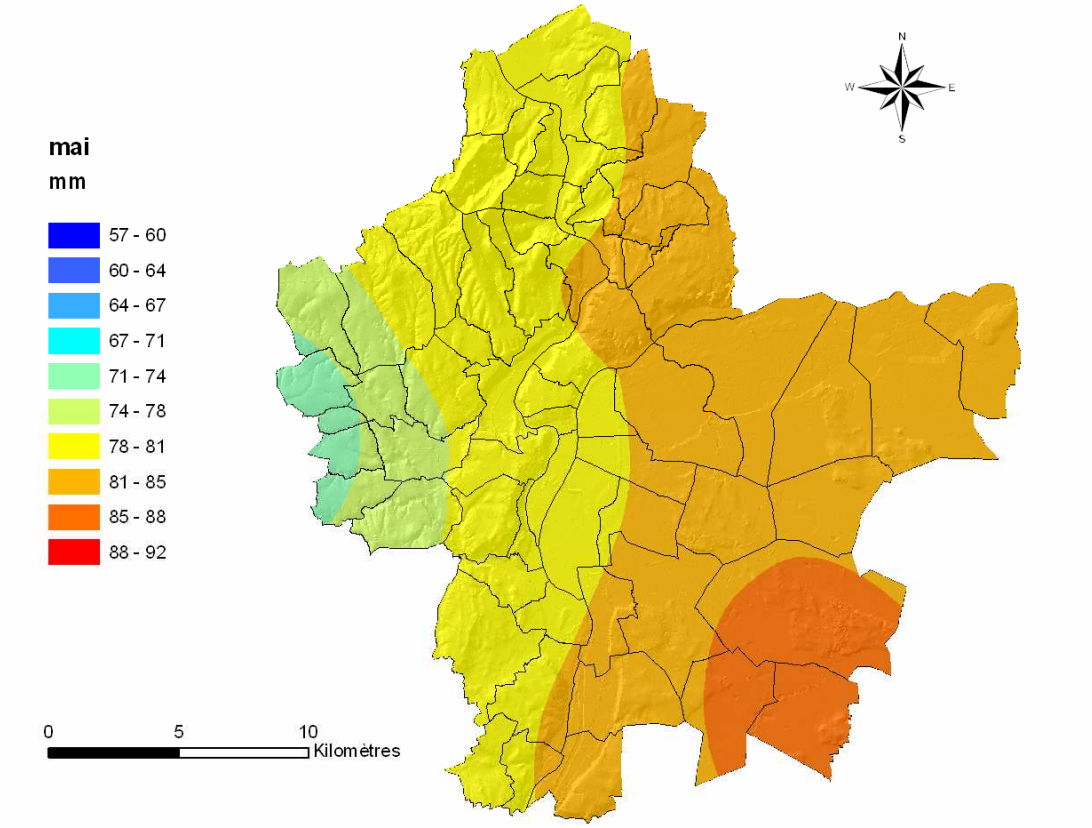
Mars :



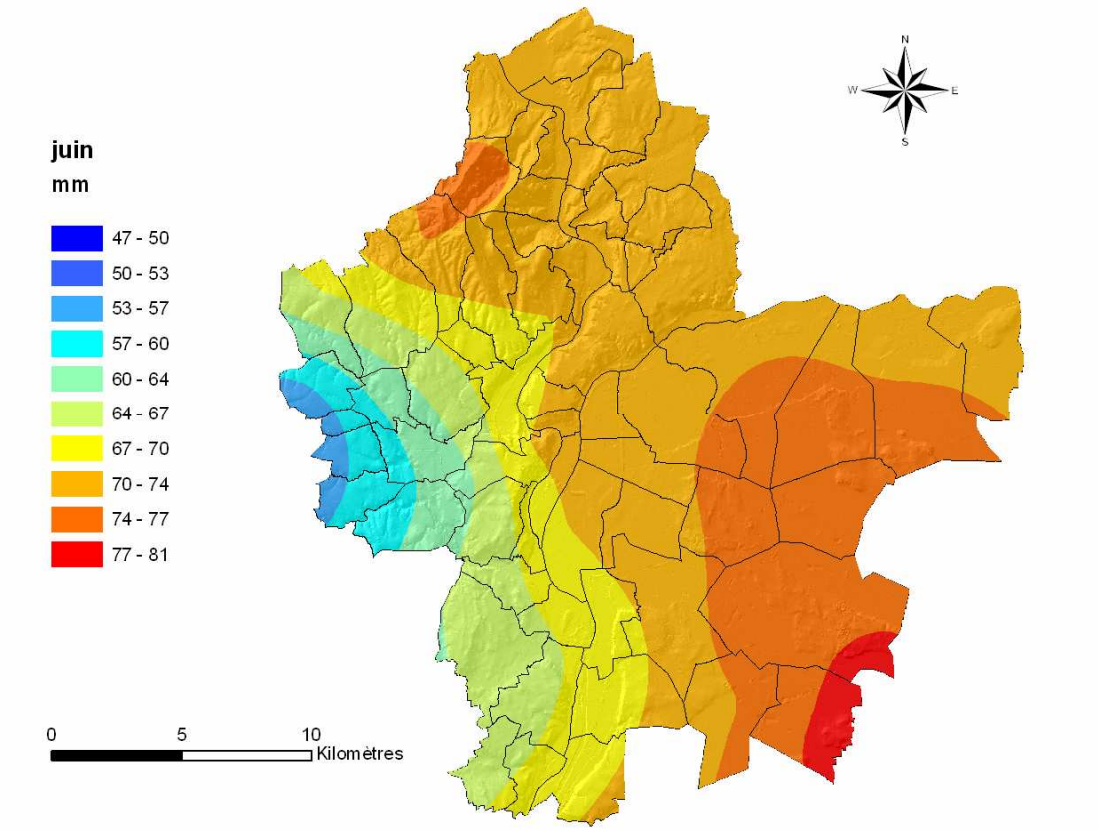
Avril :


avril
mm
66 - 69
69 - 71
71 - 74
74 - 76
76 - 79
79 - 82
82 - 84
84 - 87
87 - 89
89 - 92
0
5
10
Kilomètres
N
W
E
S

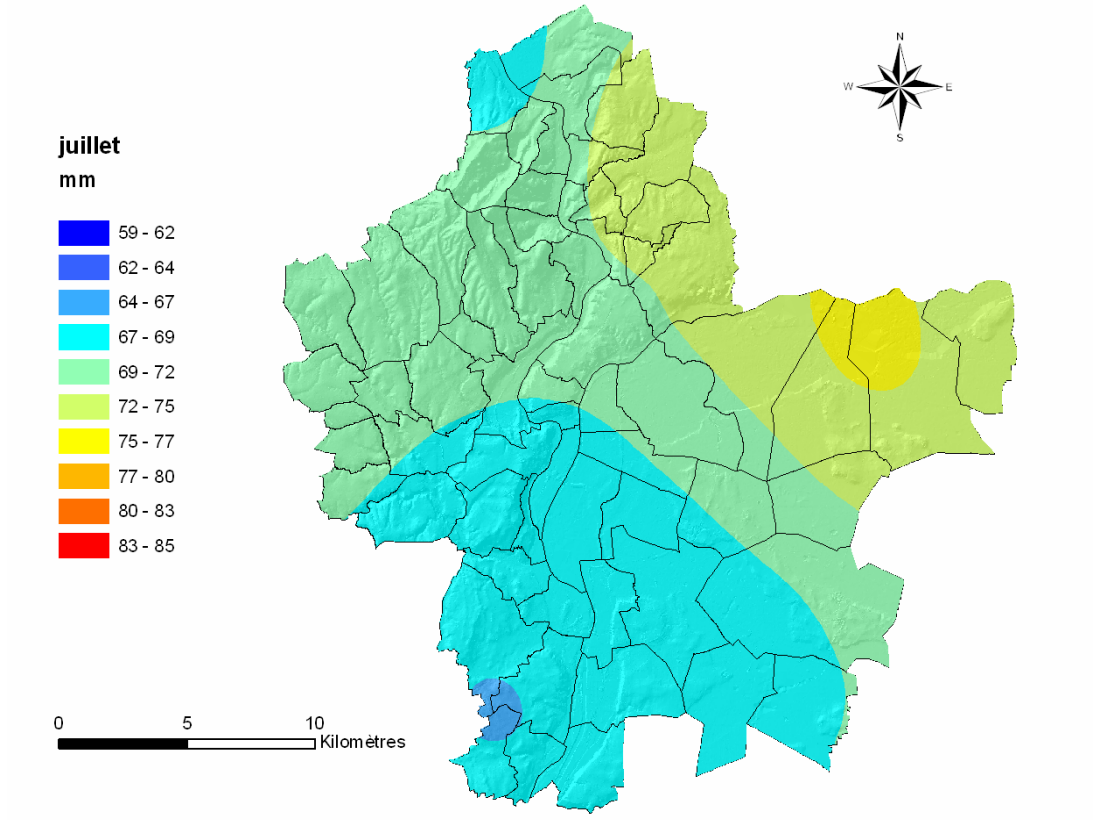
Mai :


mai
mm
57 - 60
60 - 64
64 - 67
67 - 71
71 - 74
74 - 78
78 - 81
81 - 85
85 - 88
88 - 92
0
5
10
Kilomètres
N
W
E
S

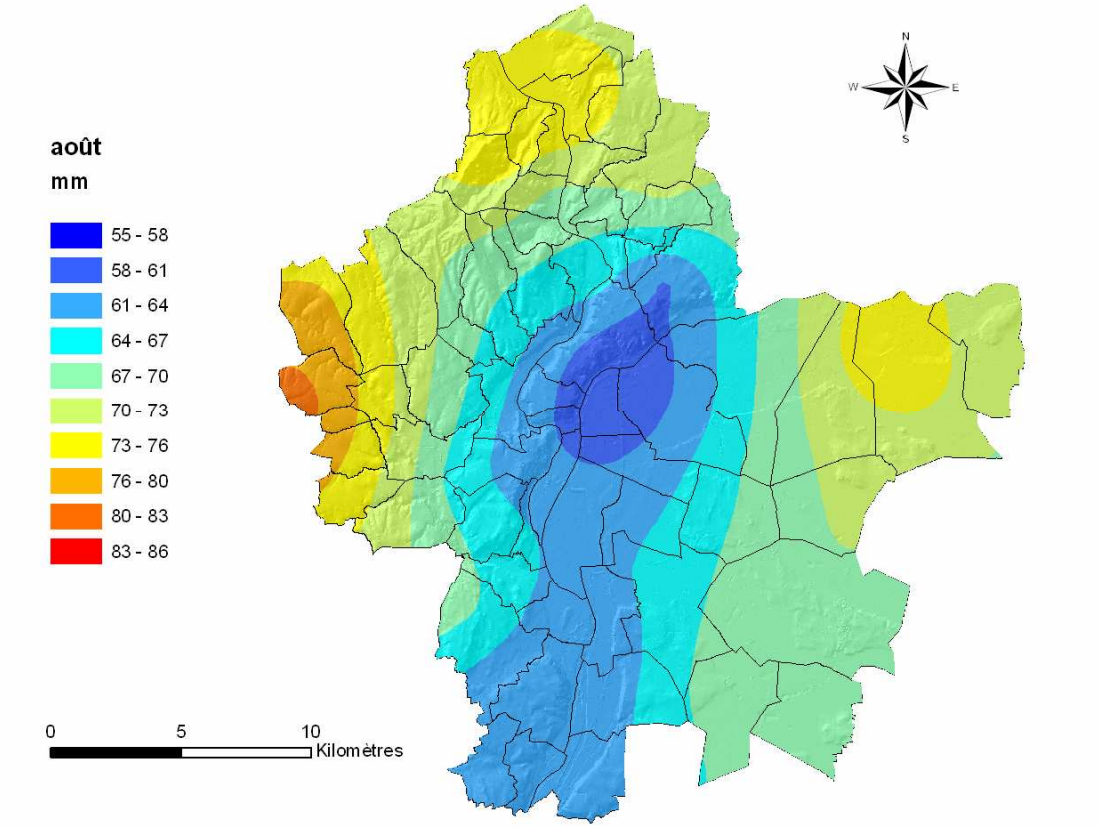
Juin :



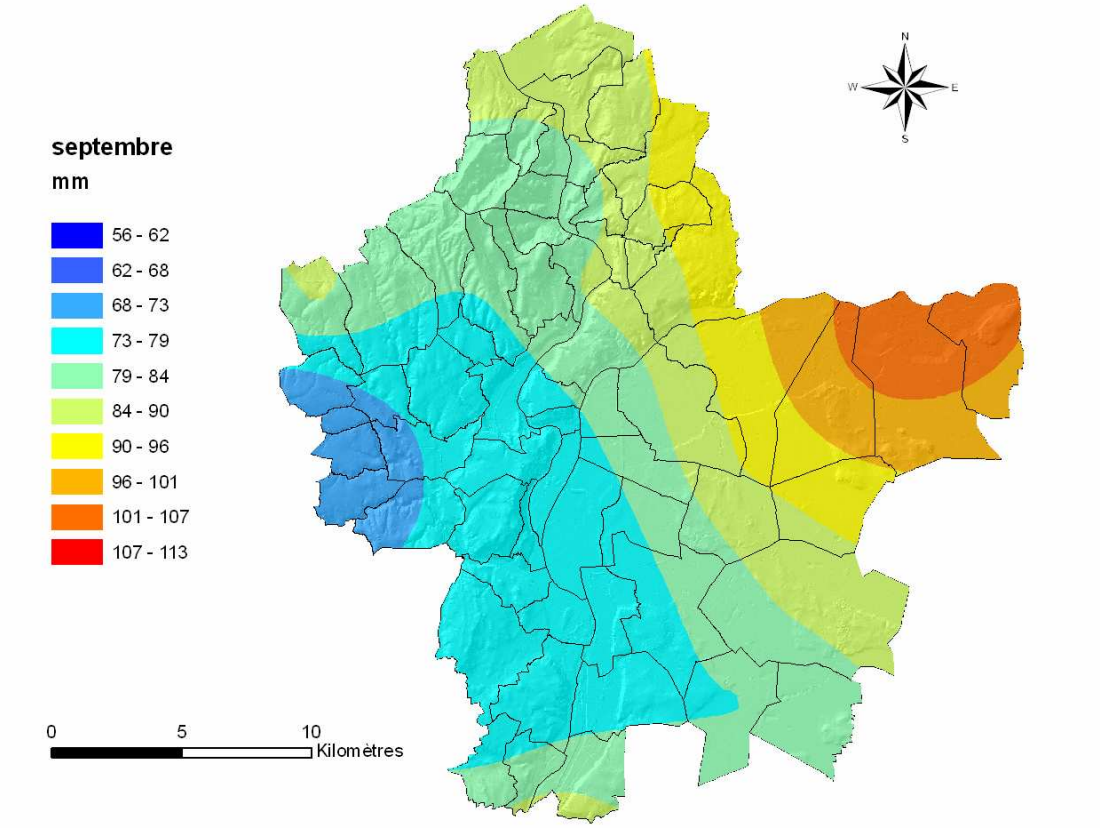
Juillet :



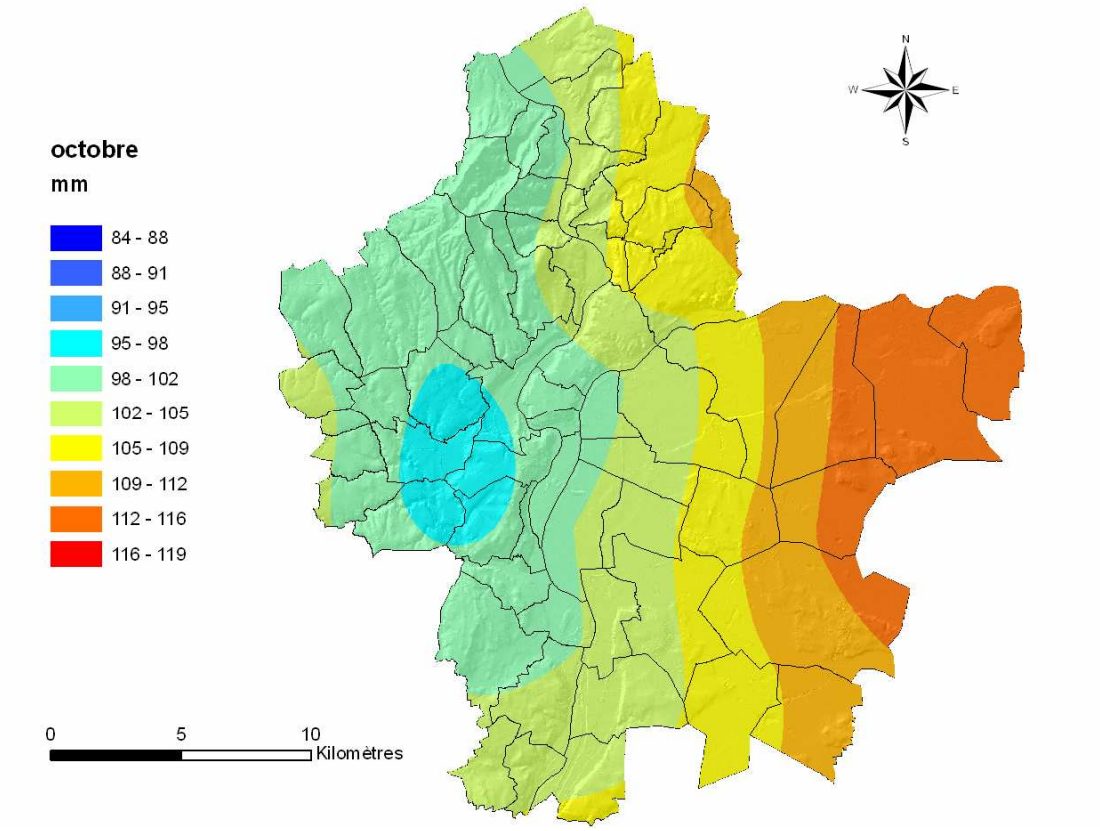
Août :



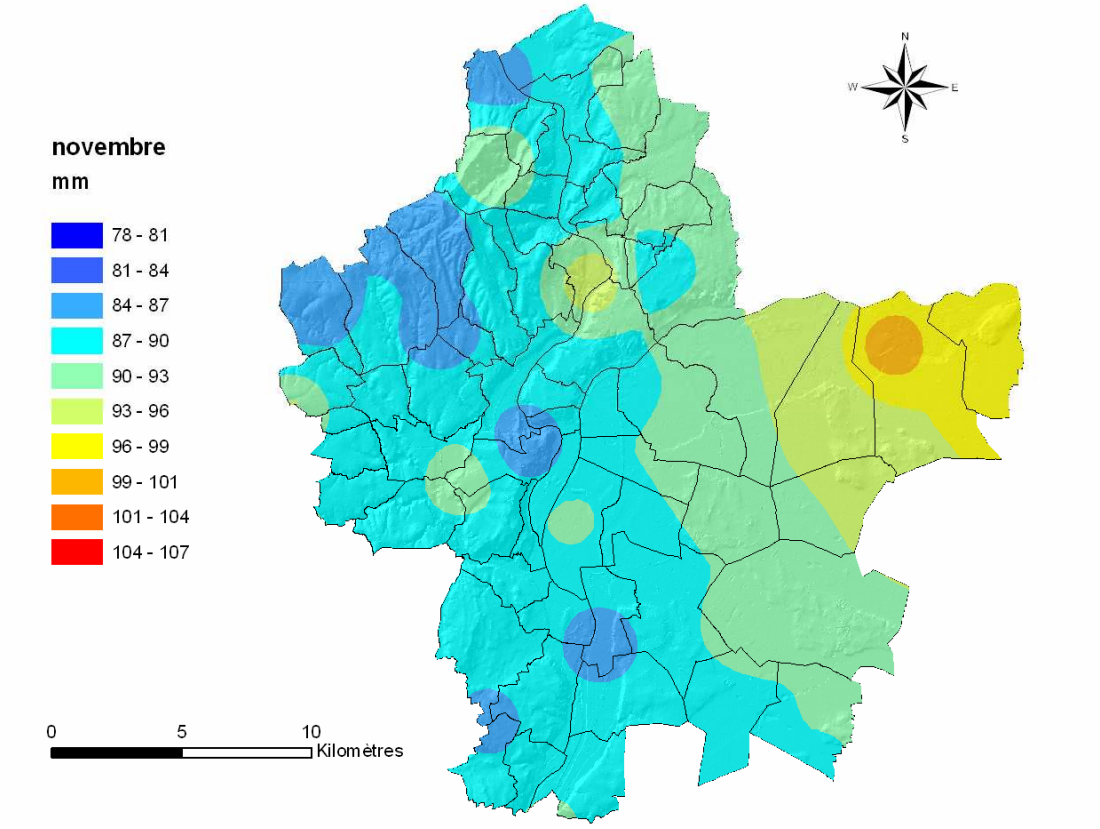
Septembre :



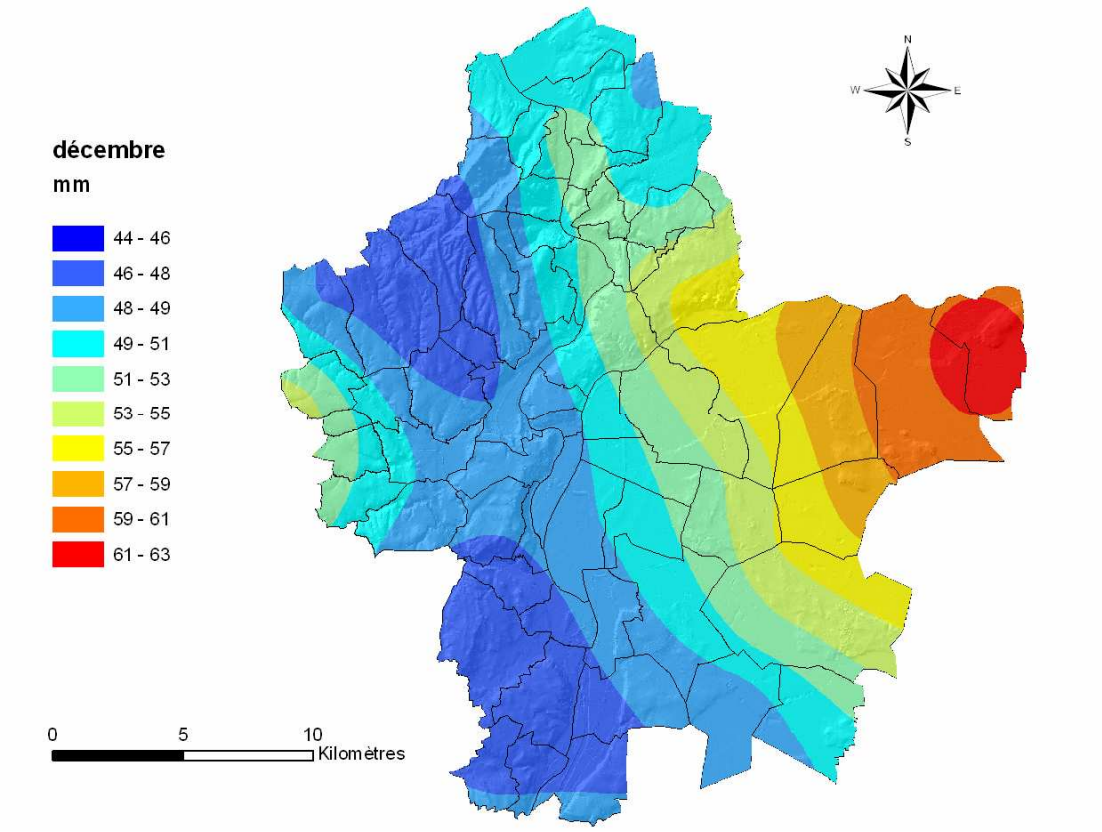
Octobre :



Novembre :

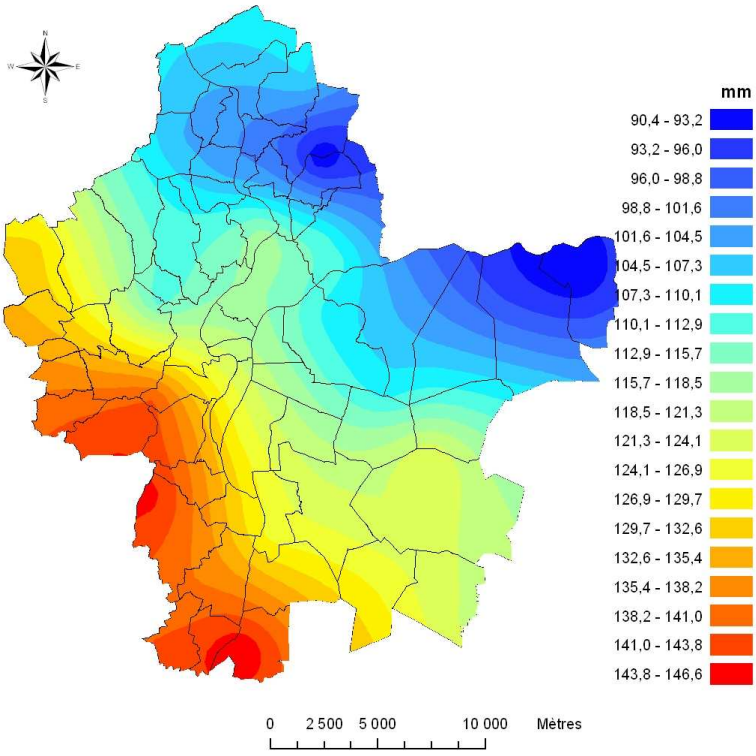


Décembre :

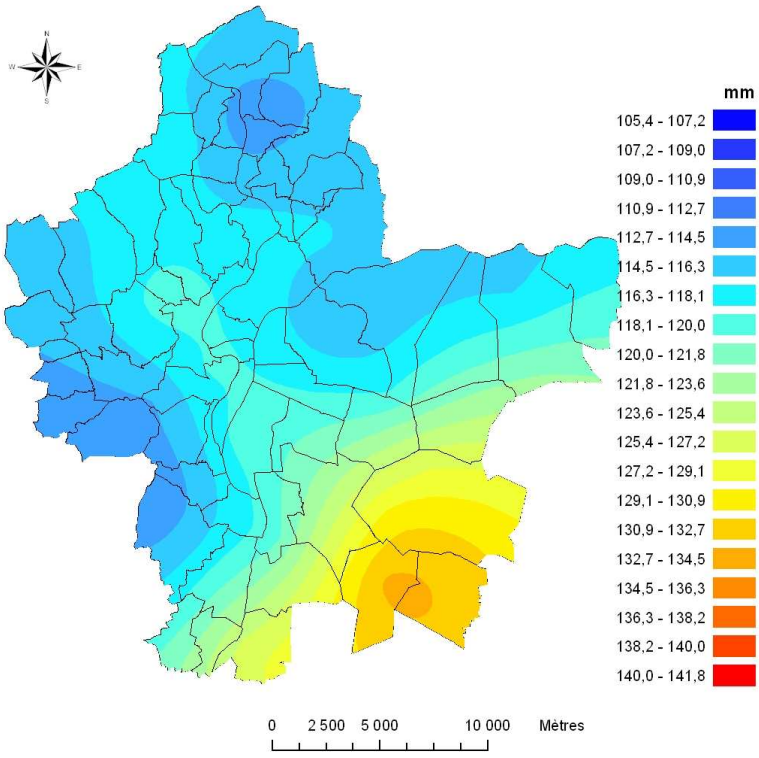

décembre
mm
44 - 46
46 - 48
48 - 49
49 - 51
51 - 53
53 - 55
55 - 57
57 - 59
59 - 61
61 - 63
N
W
E
S
0
5
10
Kilomètres

Annexe 4 : Interpolation des épisodes remarquables en terme de hauteur d'eau précipitée (krigeage ordinaire)

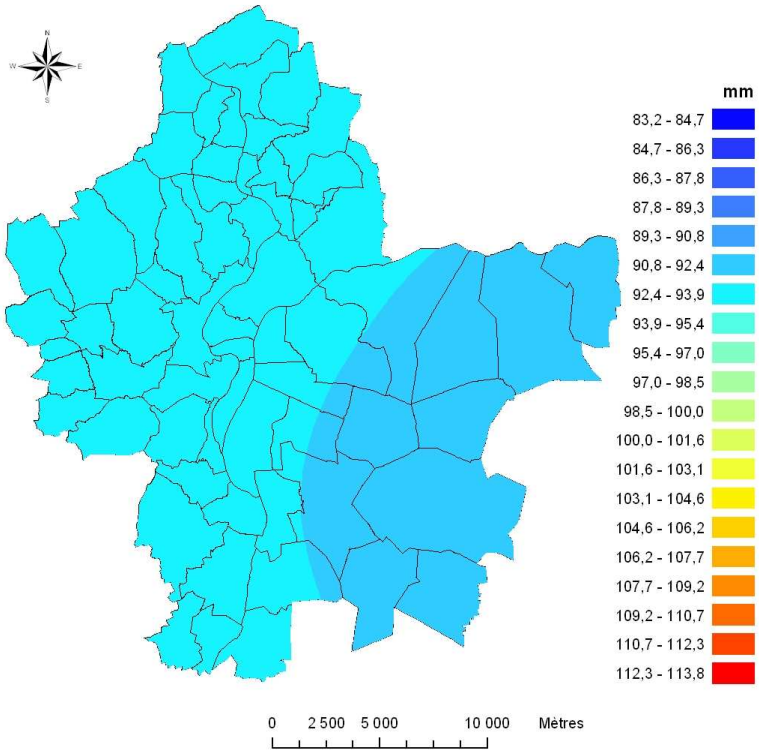
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
01/12/2003 13:48	118,1	34,6	17,3



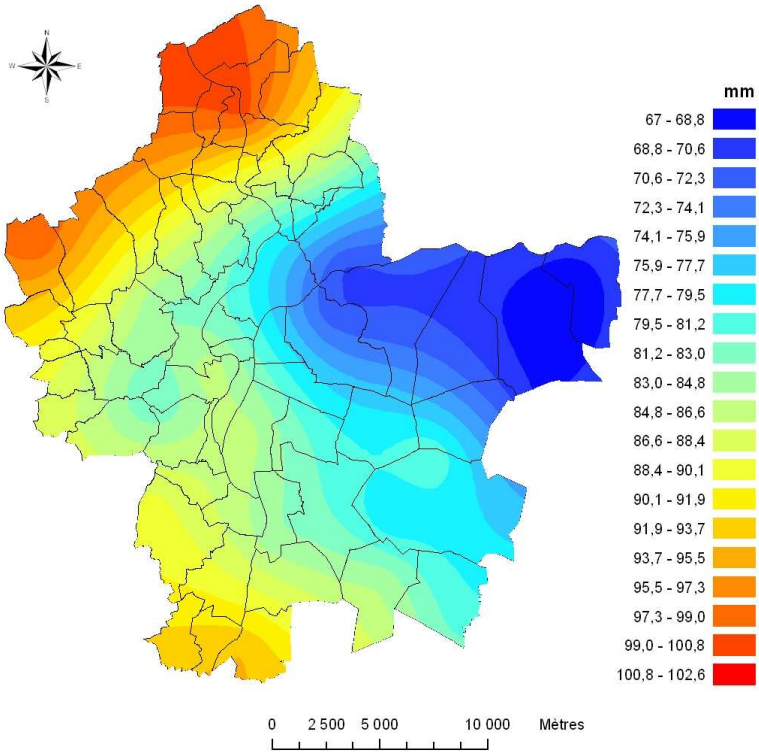
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
15/04/2005 06:30	117,9	56,1	13,3



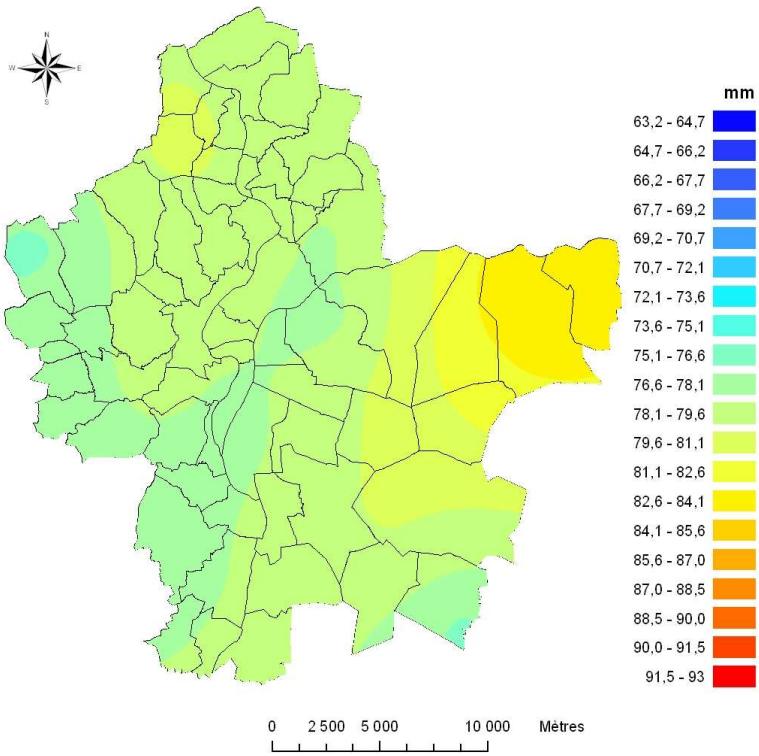
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
22/09/1993 10:30	84,3	19,1	20



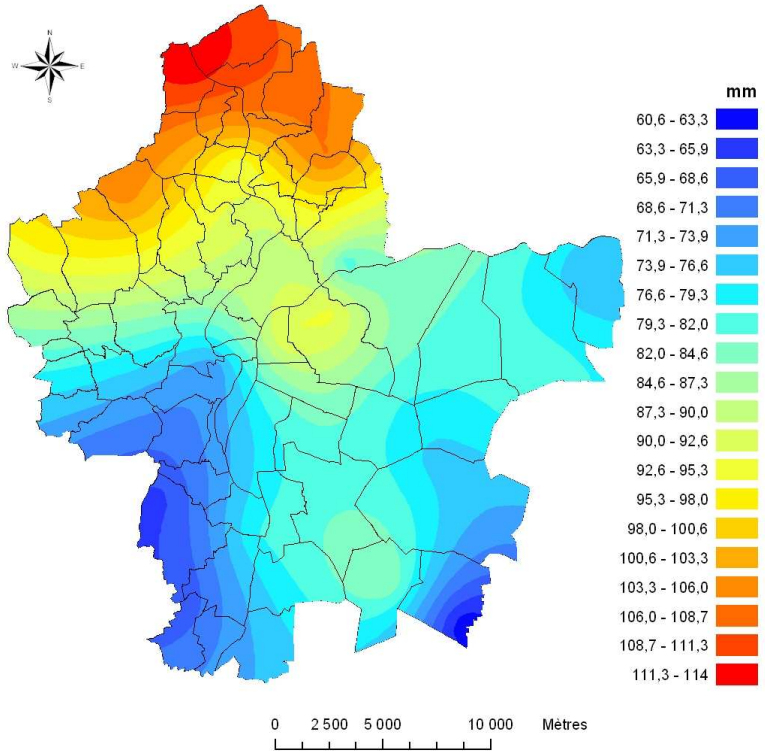
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/11/1996 15:48	83,7	13,1	40,7



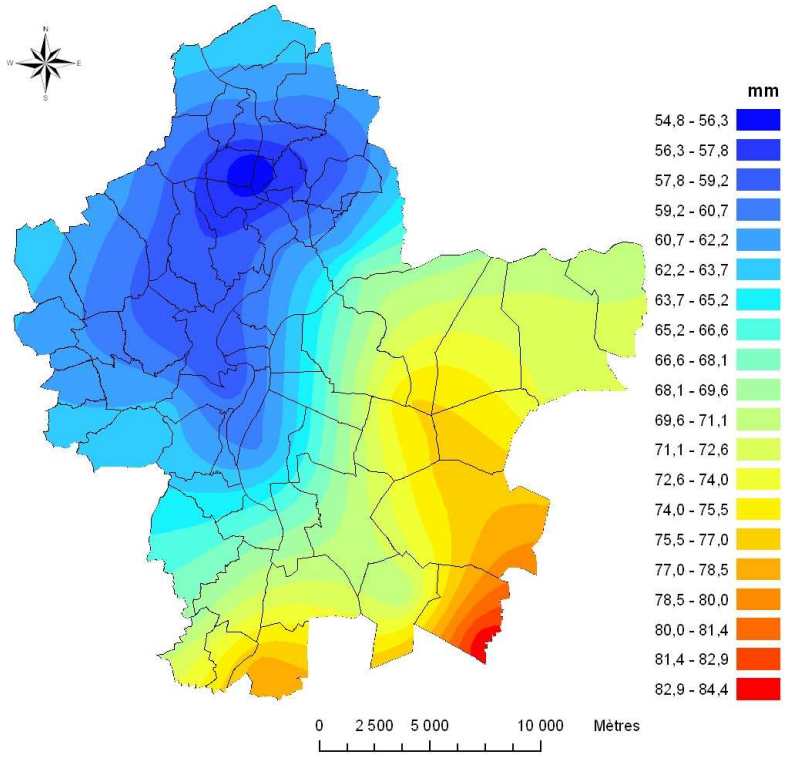
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
22/10/1999 18:24	79,2	12,1	55,3



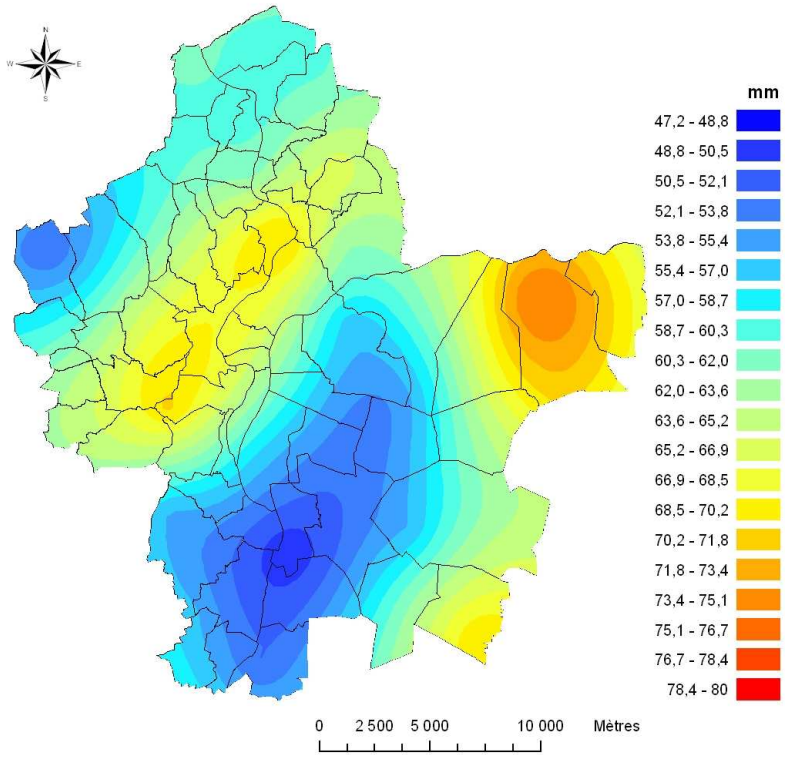
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
28/09/1991 20:00	76,1	29,2	24



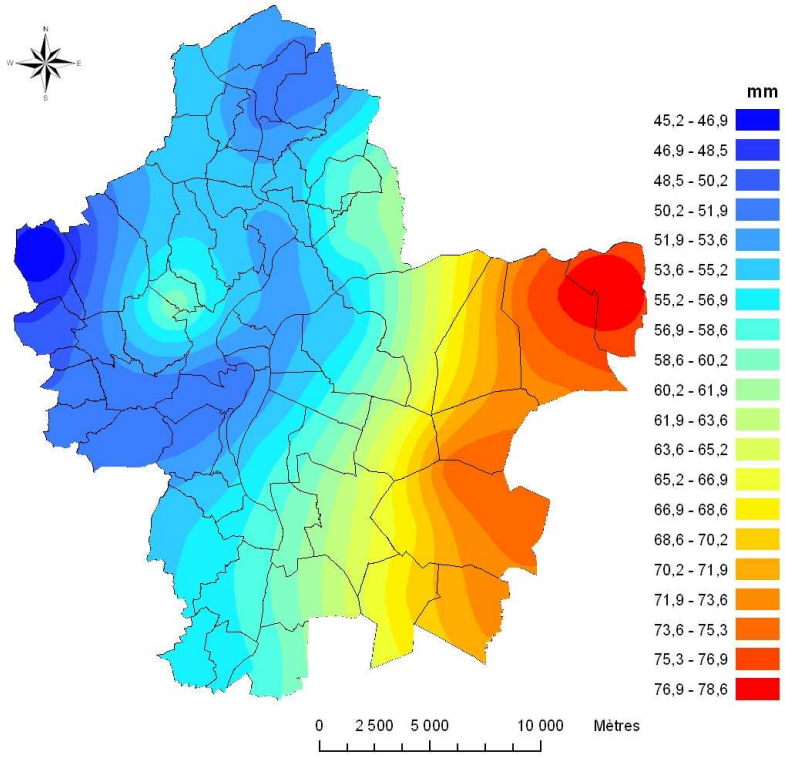
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
23/11/2002 19:24	66,3	34,1	22



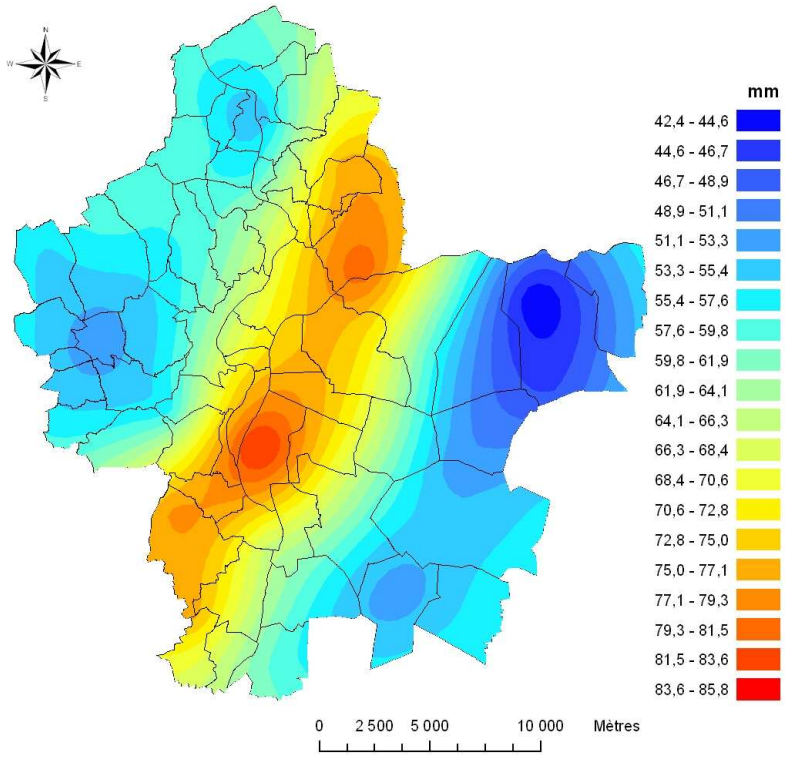
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/10/1993 05:48	61,4	36,6	24



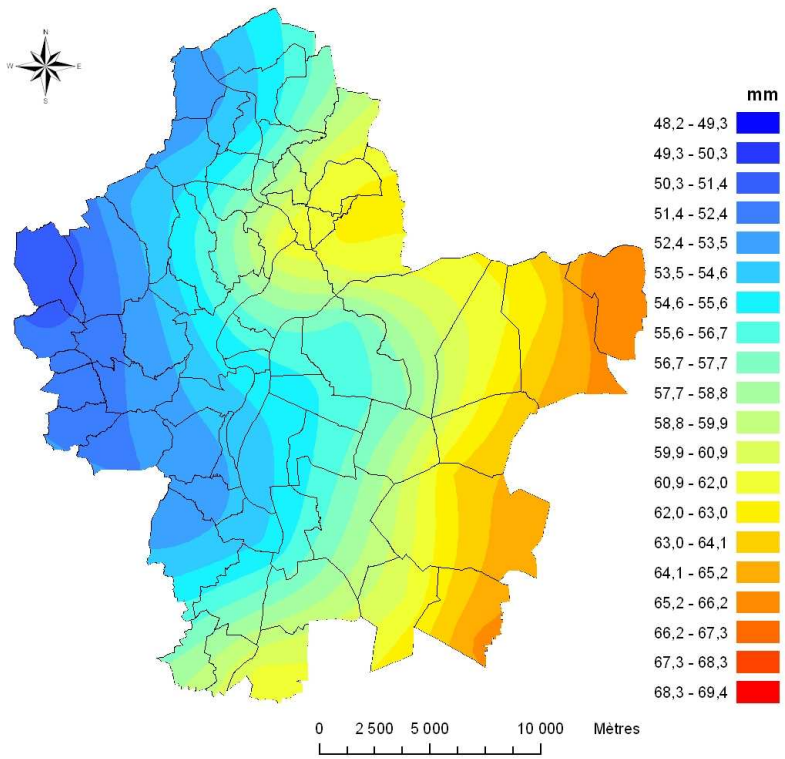
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
04/10/1995 22:42	60,1	13,8	32,7



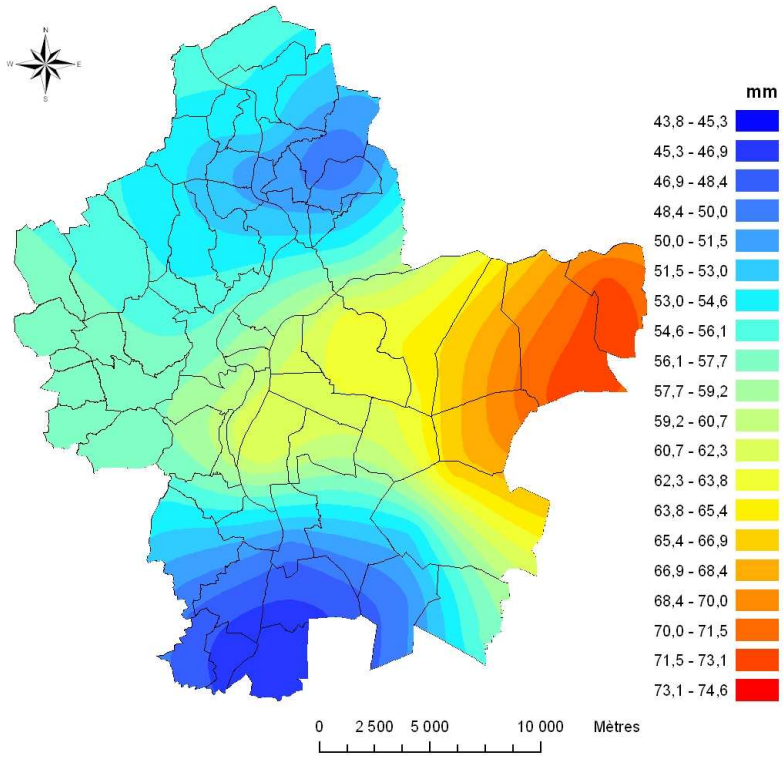
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
14/07/2001 17:18	60	22,6	60



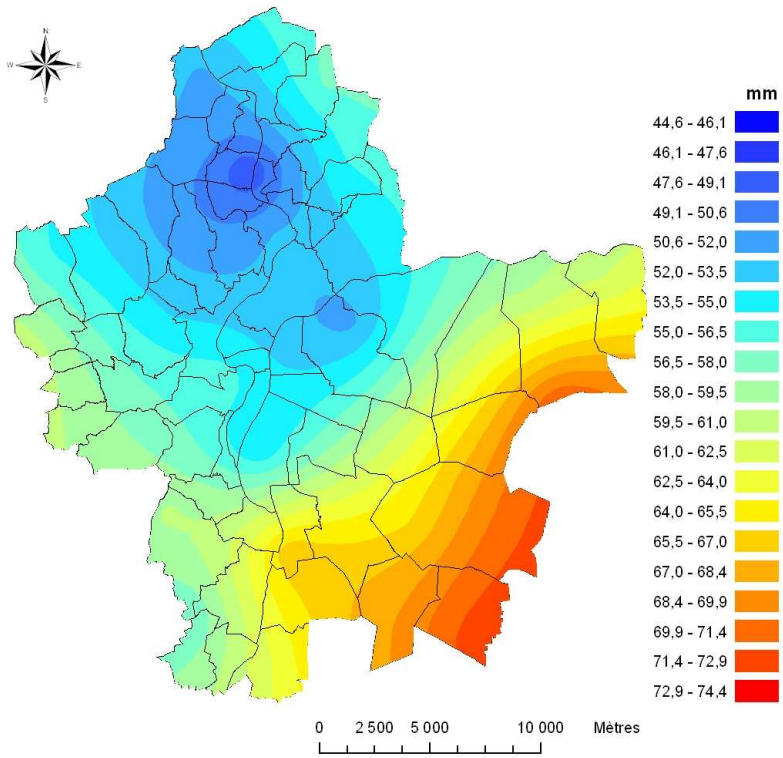
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
01/05/2002 08:06	57,8	43,3	10



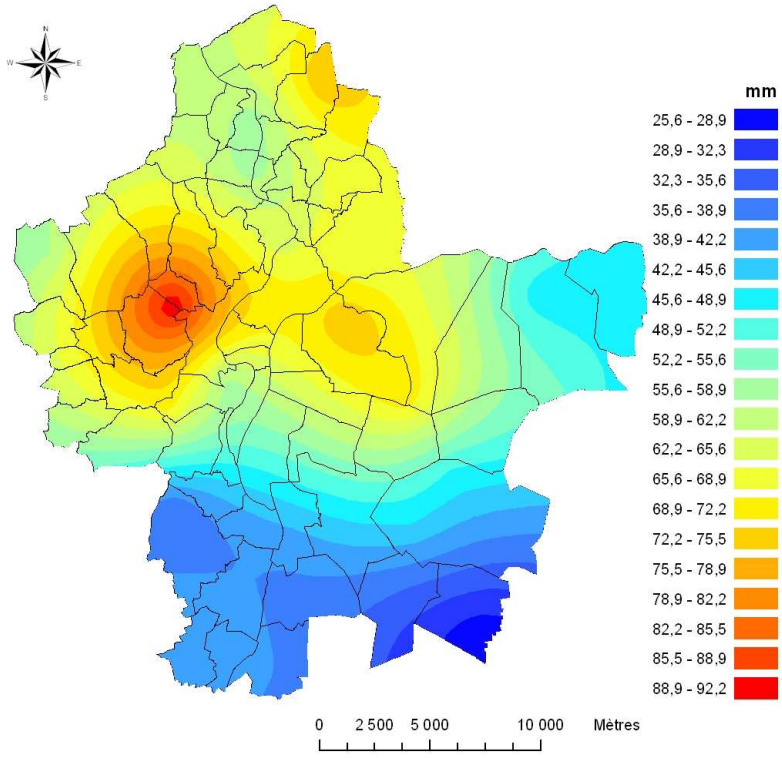
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
21/06/1997 14:00	54,7	27,1	38,7



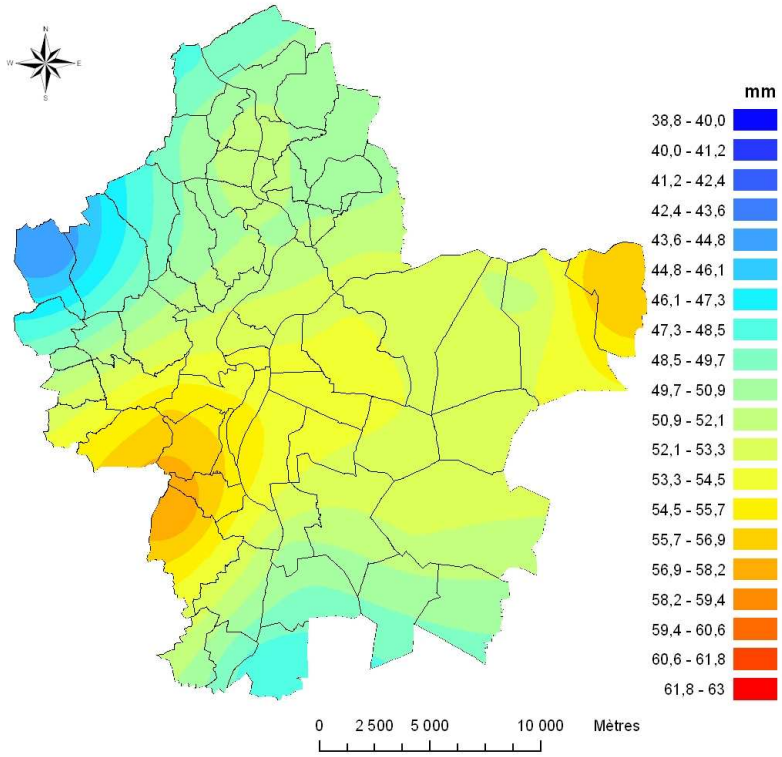
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
25/10/2004 13:24	53,2	19,2	24,7



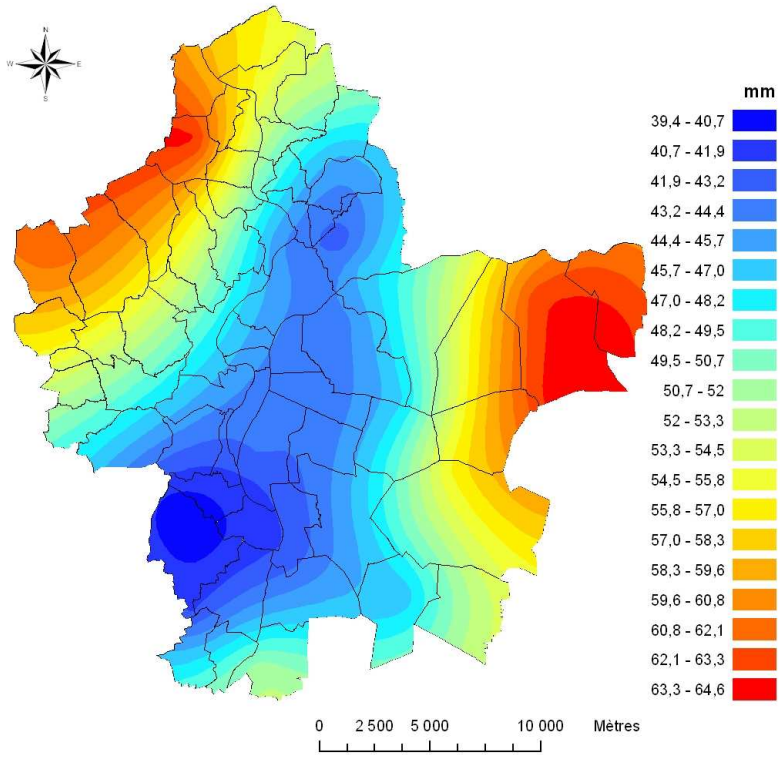
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
05/07/1999 14:30	52,1	11,5	42,7



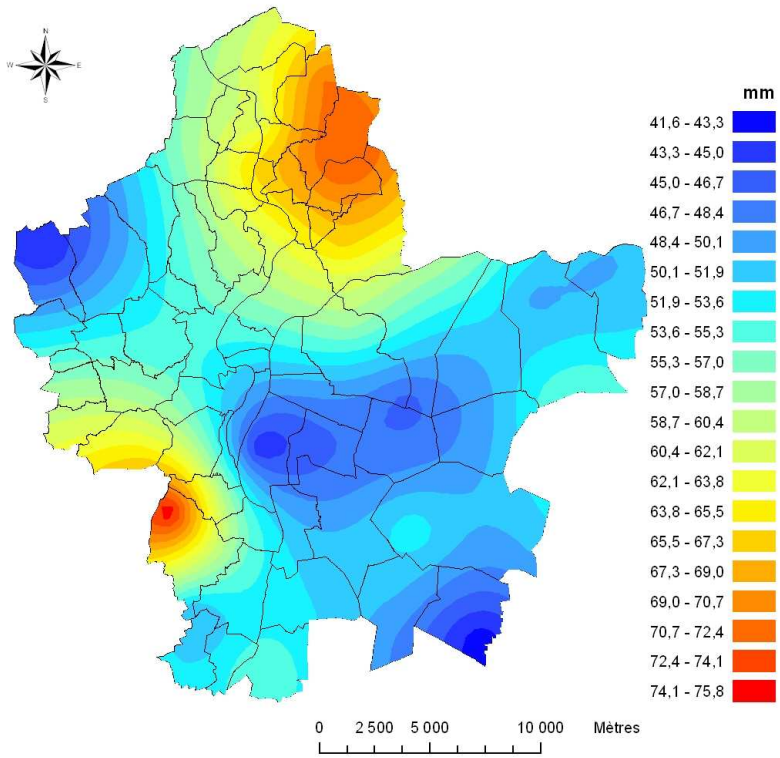
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/09/1995 02:30	51,7	31,2	34,7



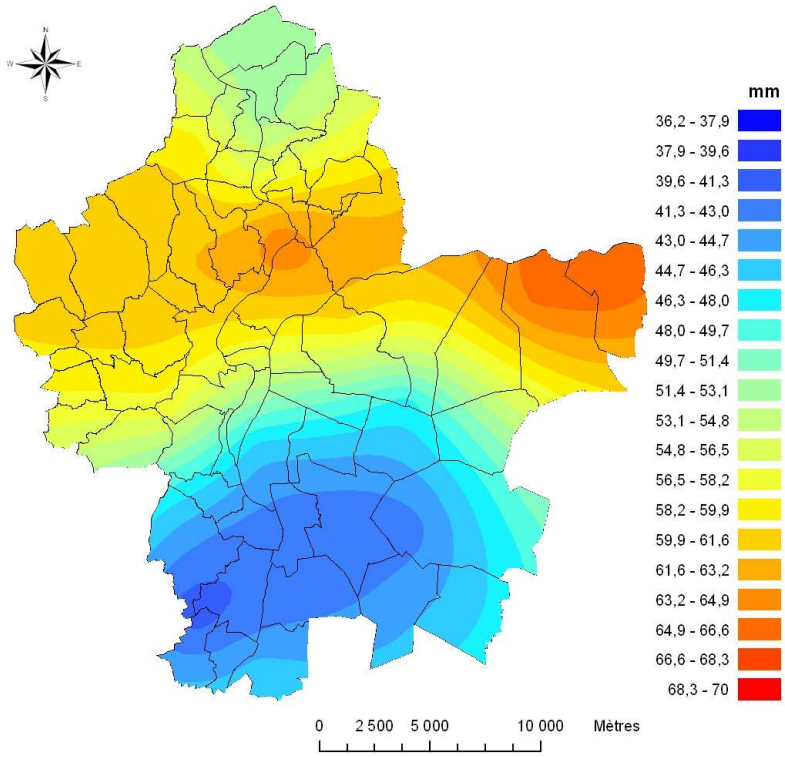
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/07/1996 09:18	51,7	32,6	14



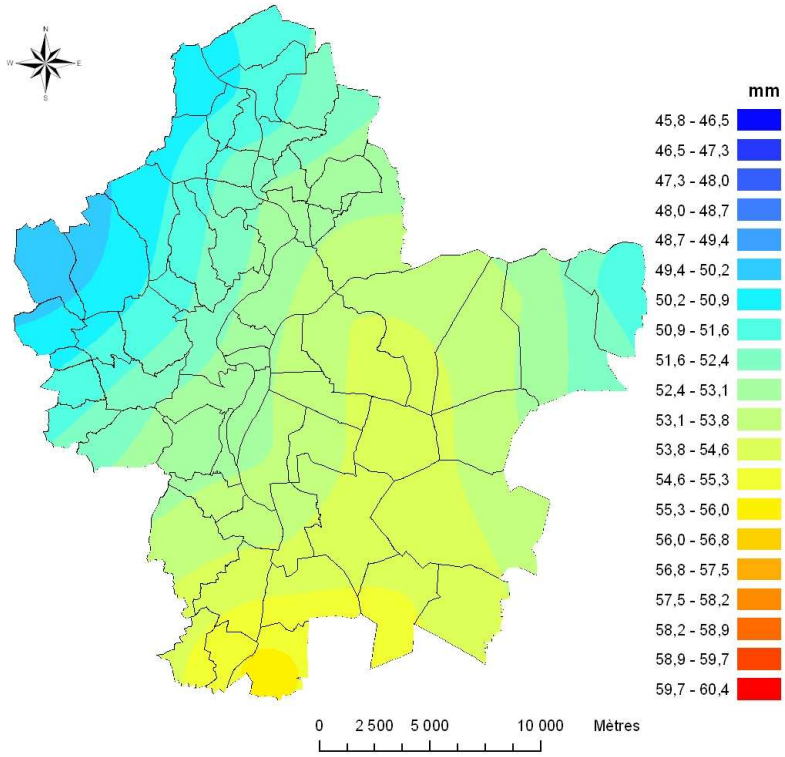
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
05/10/1993 12:30	51	13,9	25,3



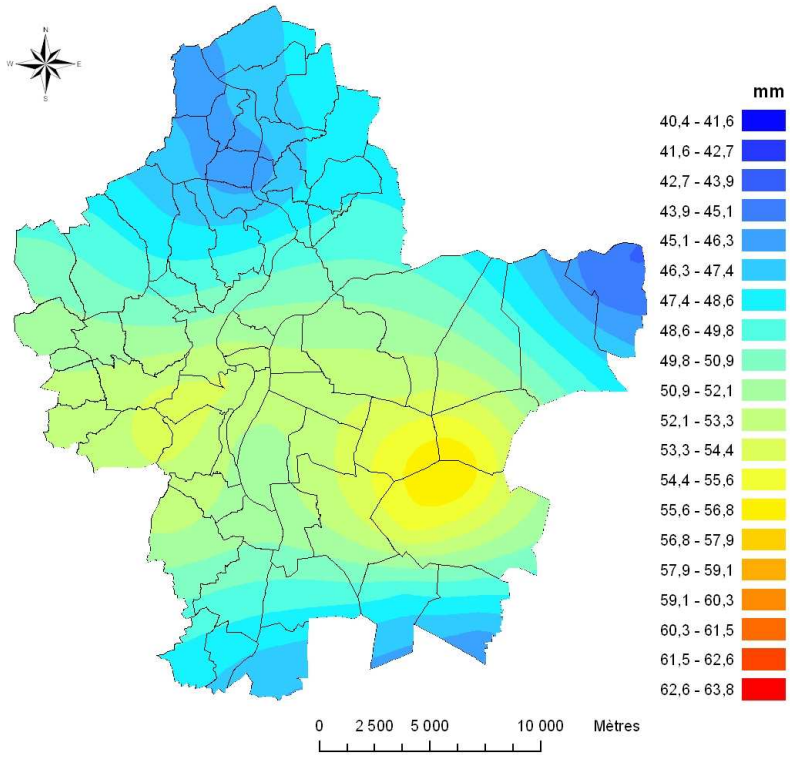
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/09/1994 07:36	50,5	17	65,3



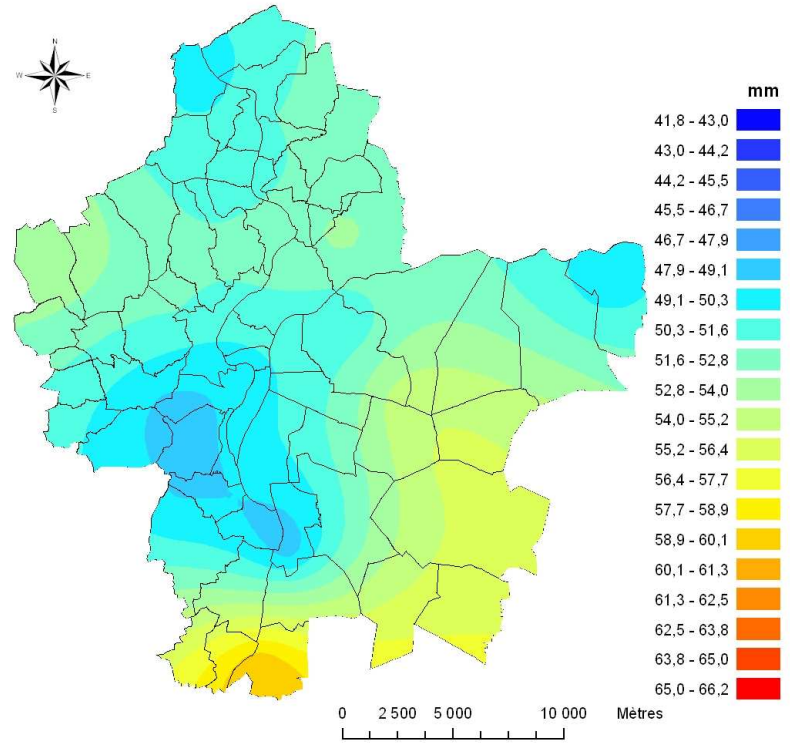
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
05/11/1994 05:30	50	15,7	14



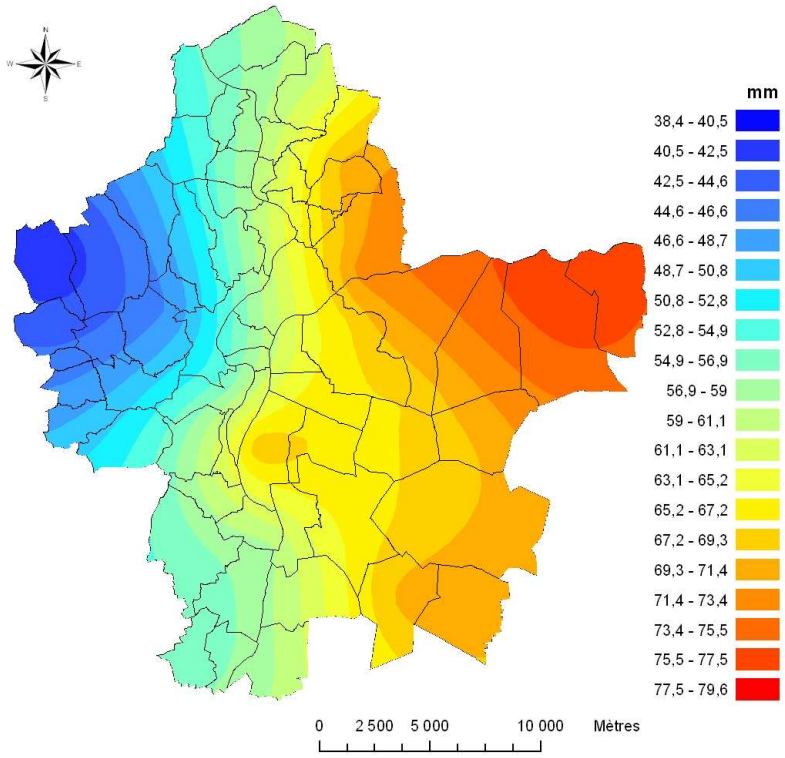
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
17/08/2004 00:36	49,9	19,8	30



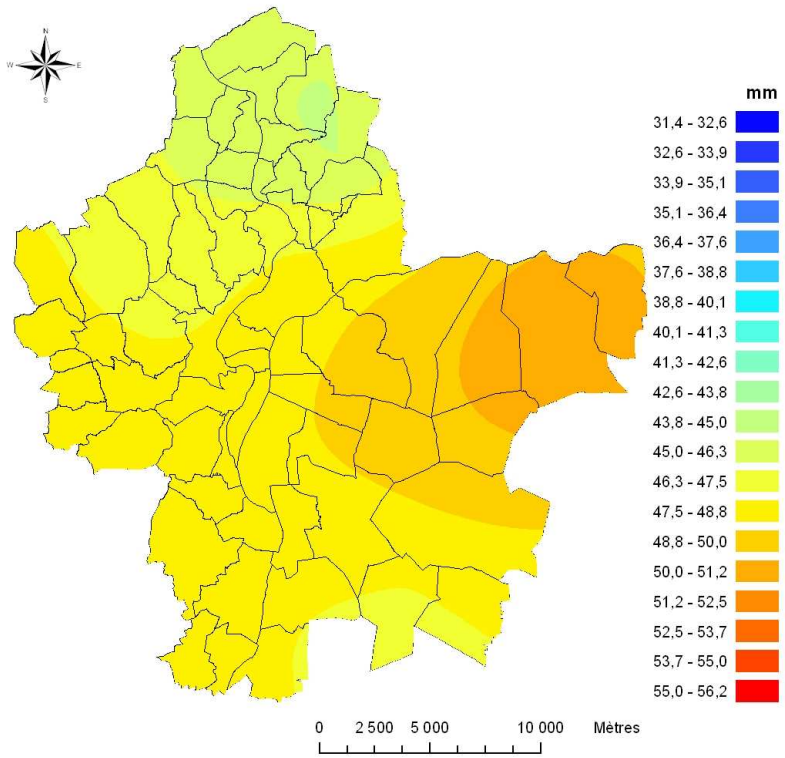
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
18/05/1996 20:48	49,4	10,3	40,7



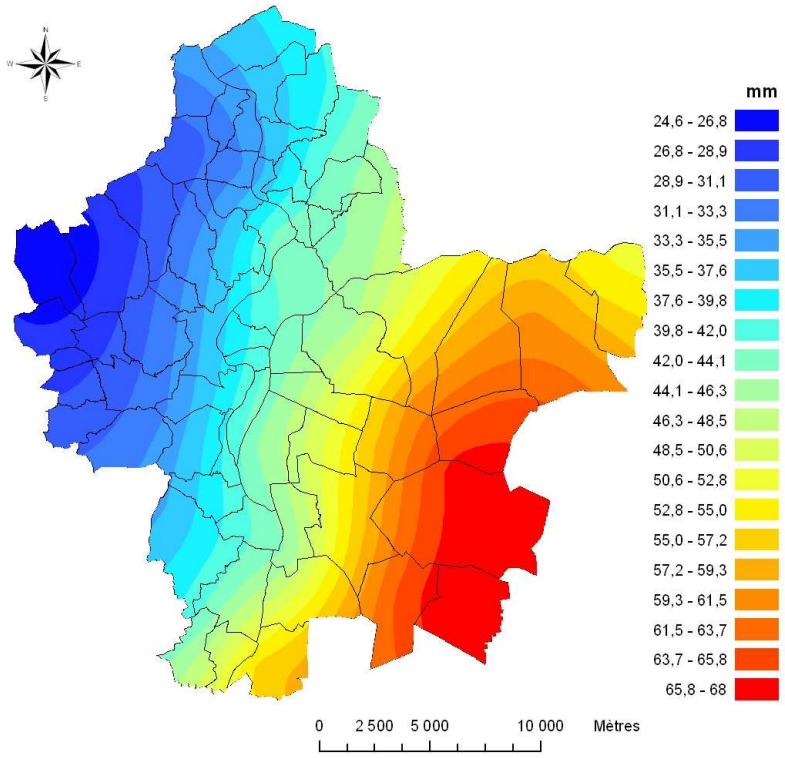
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
03/11/1989 00:00	48,2	24,7	28,7



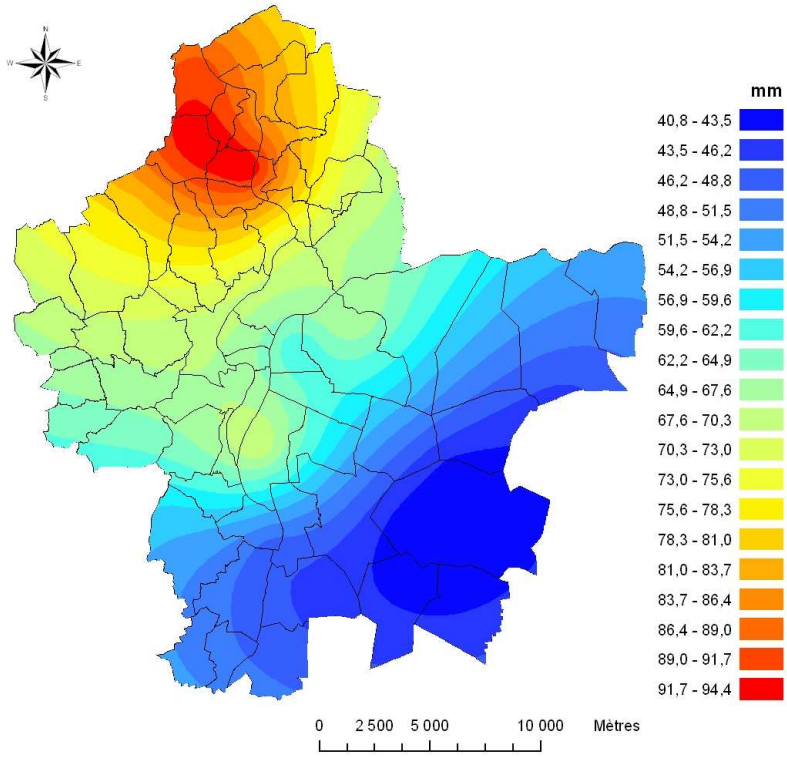
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
13/03/2004 05:12	47,6	21,2	7,3



Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/10/2000 12:48	46,4	12,8	16,7

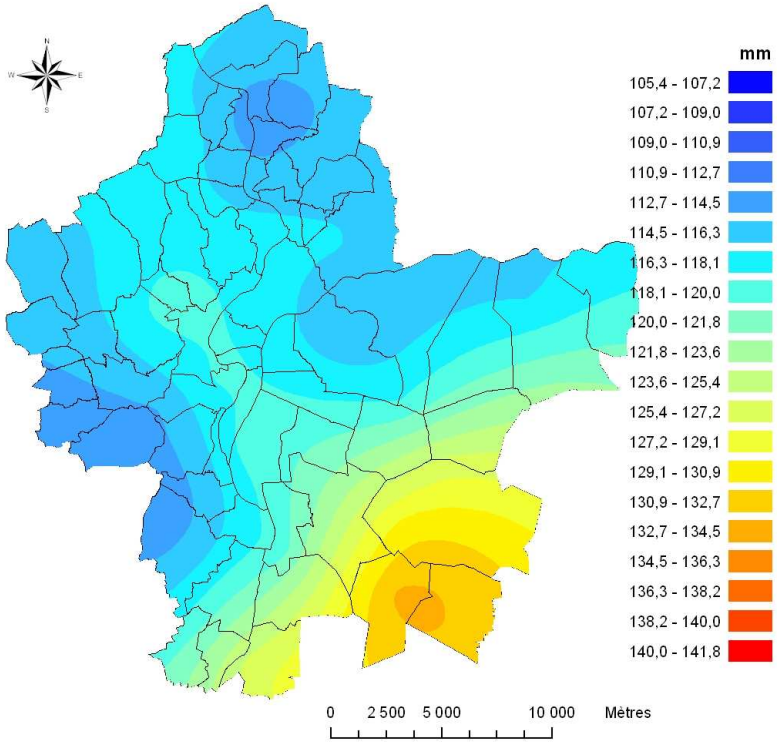


Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
25/04/1989 01:18	44,9	33,8	23,3

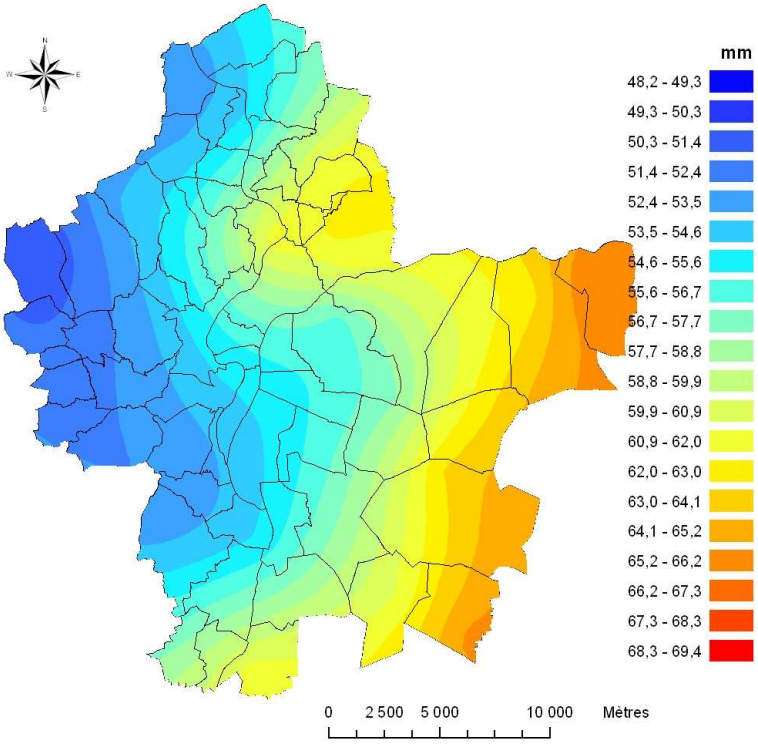


Annexe 5 : Interpolation des épisodes remarquables en terme de durée (krigeage ordinaire)

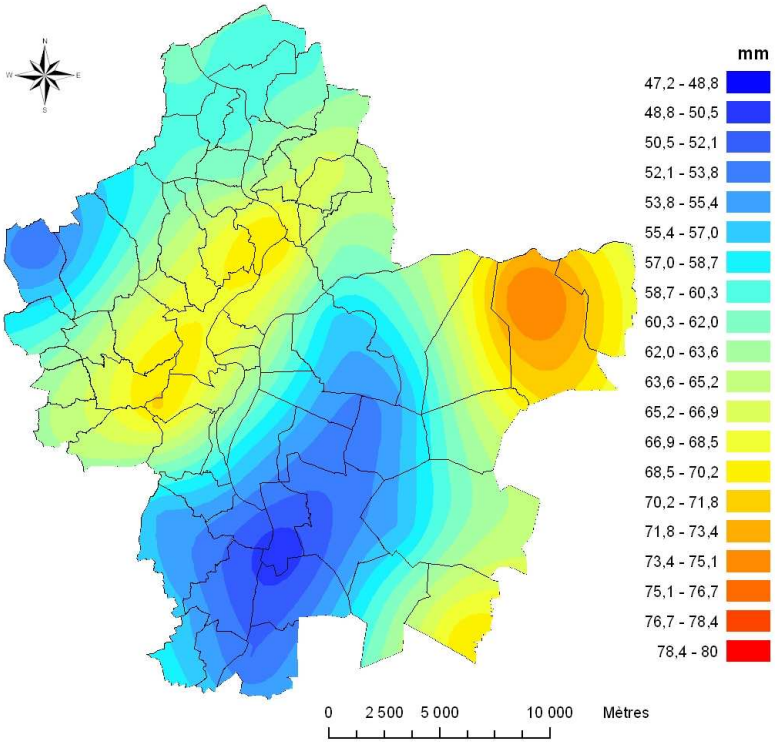
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
15/04/2005 06:30	117,9	56,1	13,3



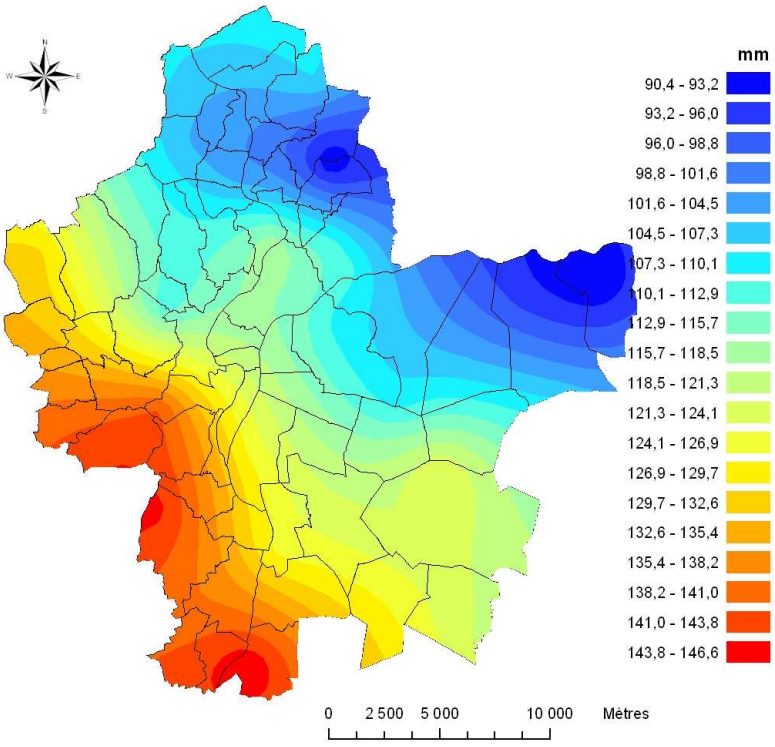
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
01/05/2002 08:06	57,8	43,3	10



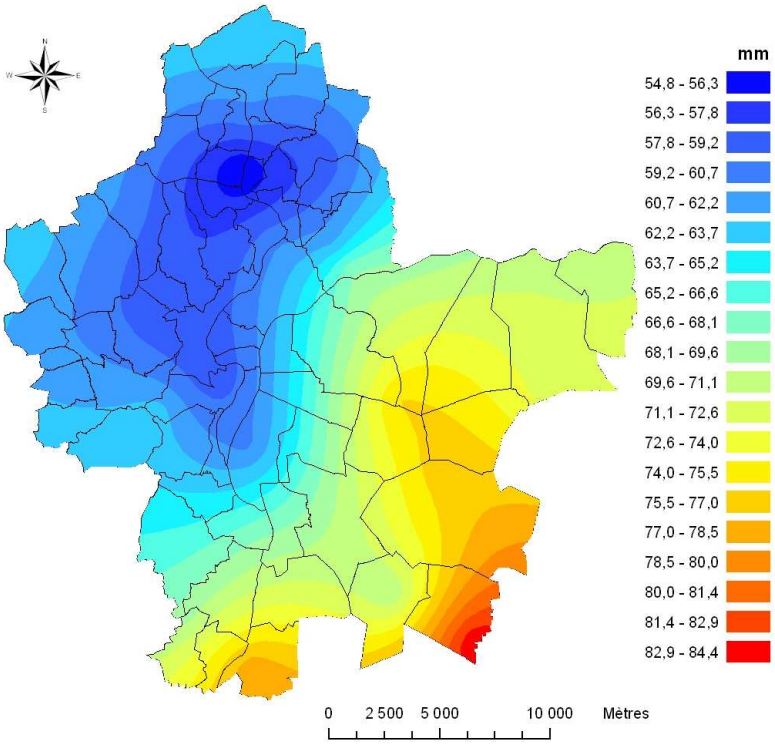
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/10/1993 05:48	61,4	36,6	24



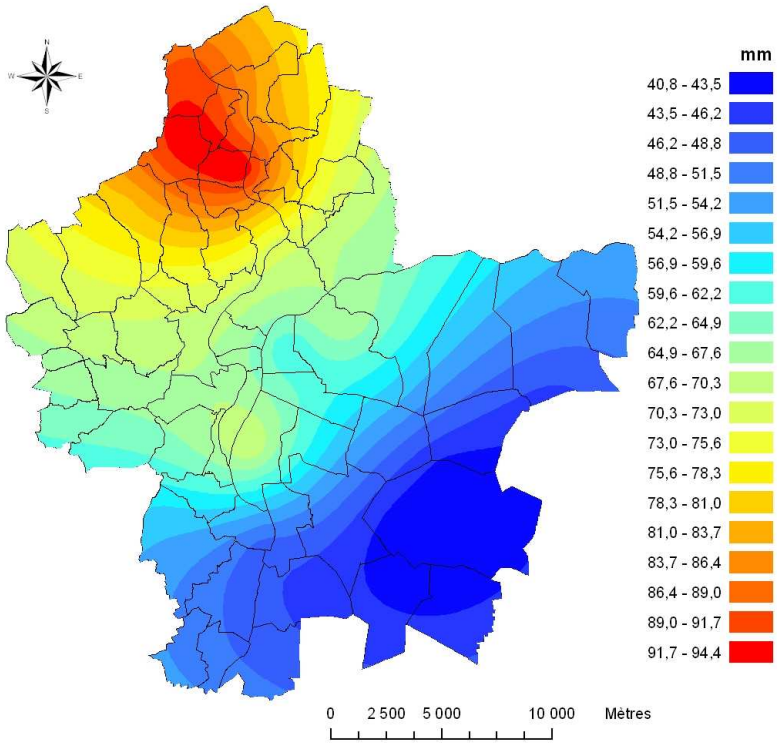
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
01/12/2003 13:48	118,1	34,6	17,3



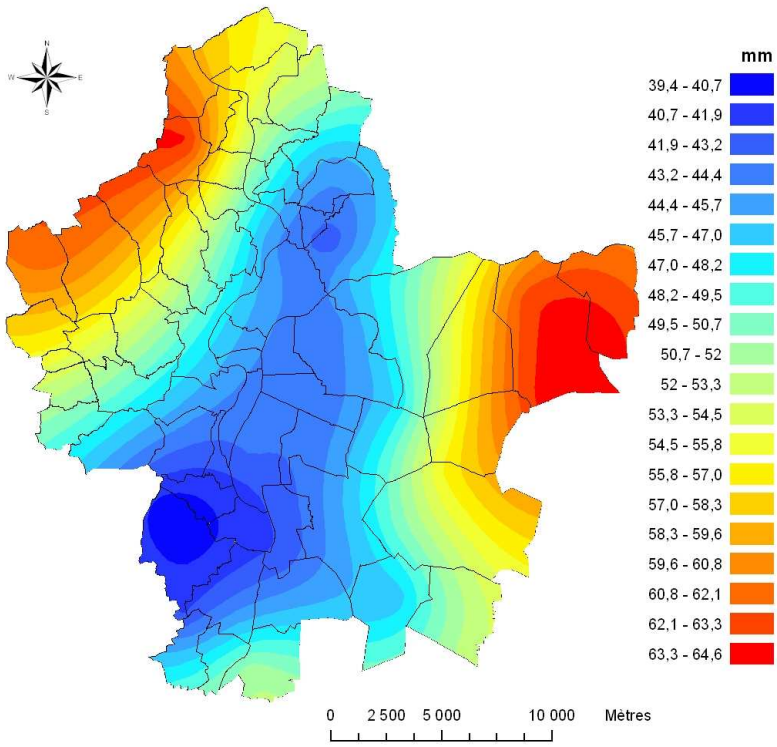
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
23/11/2002 19:24	66,3	34,1	22



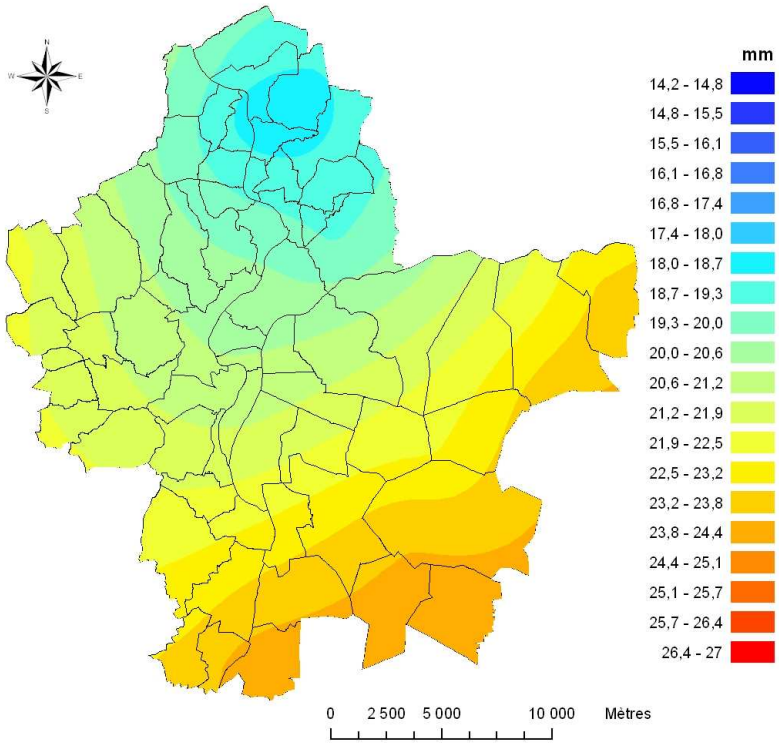
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
25/04/1989 01:18	44,9	33,8	23,3



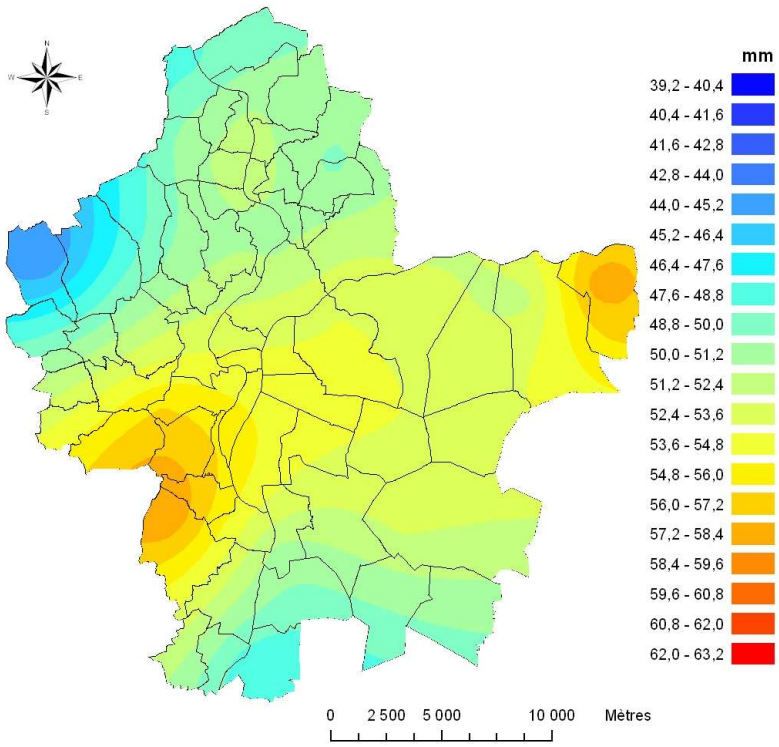
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/07/1996 09:18	51,7	32,6	14



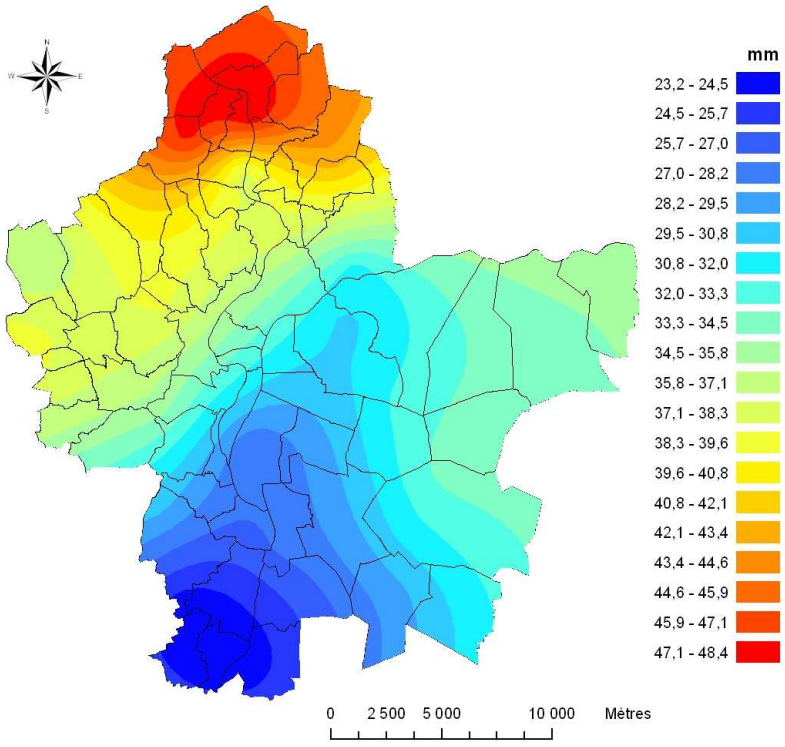
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
26/03/1999 06:30	21,4	32,4	14



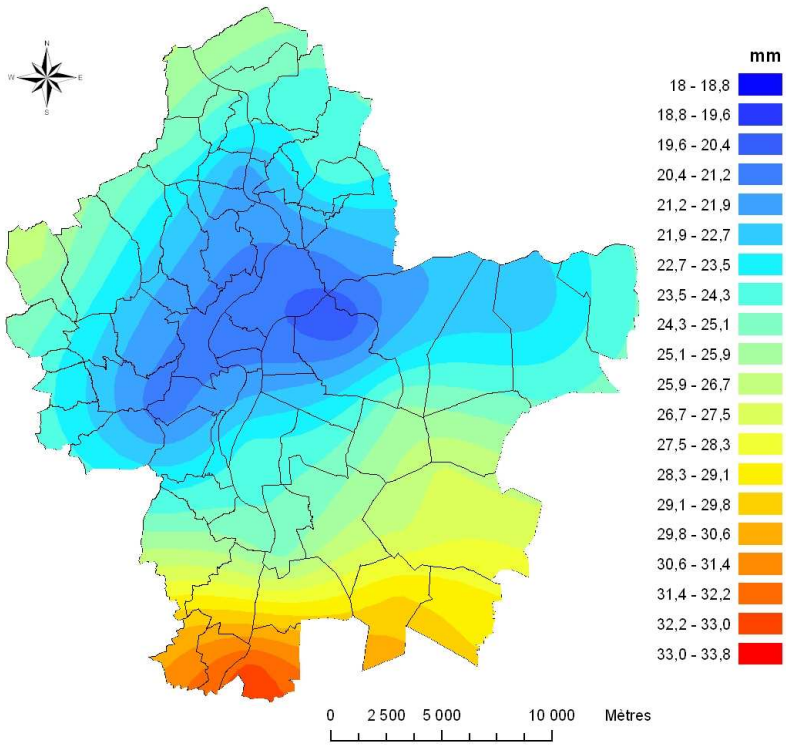
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/09/1995 02:30	51,7	31,2	34,7



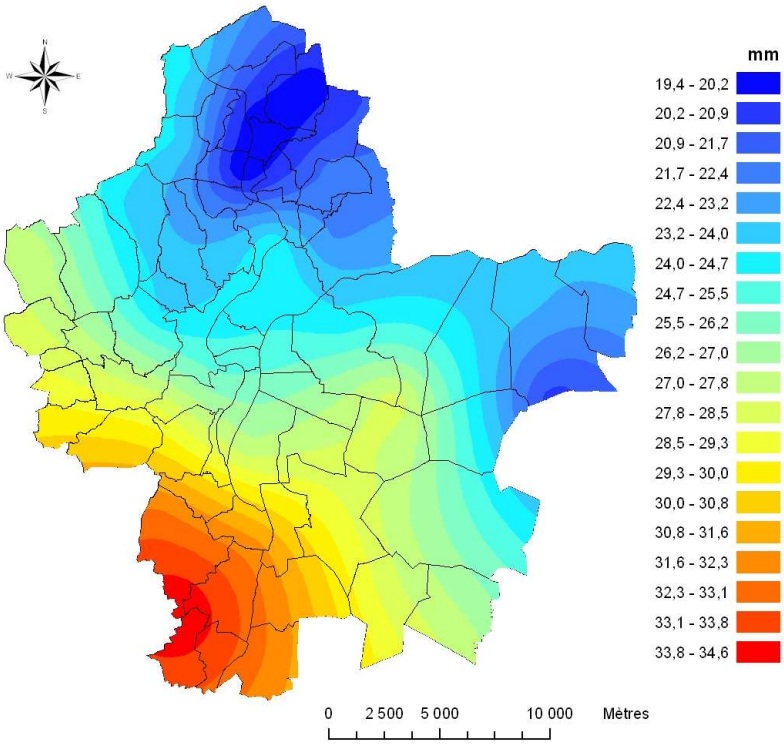
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/04/2005 03:48	34,7	31,2	15,3



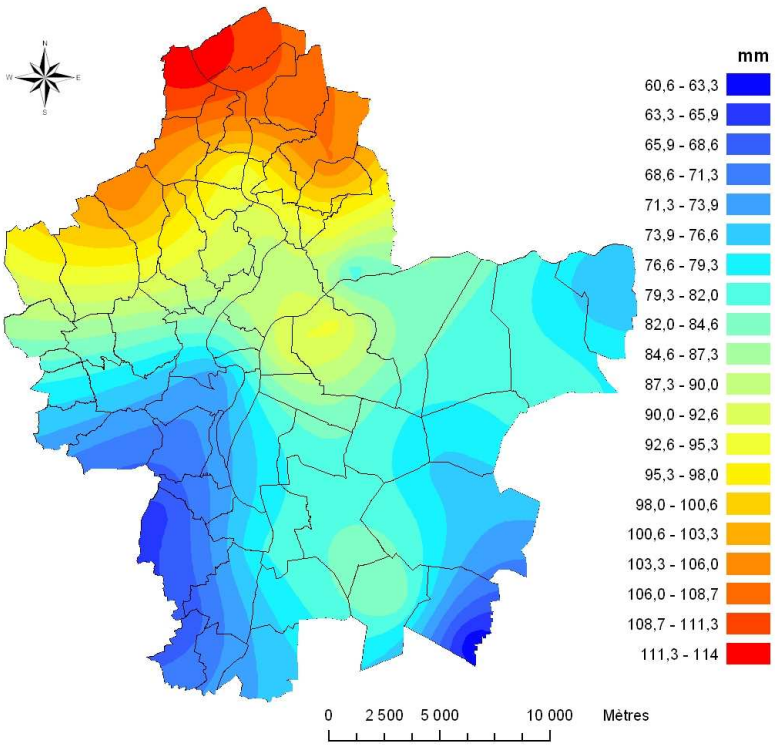
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
15/10/1996 01:00	25,7	30,3	9,3



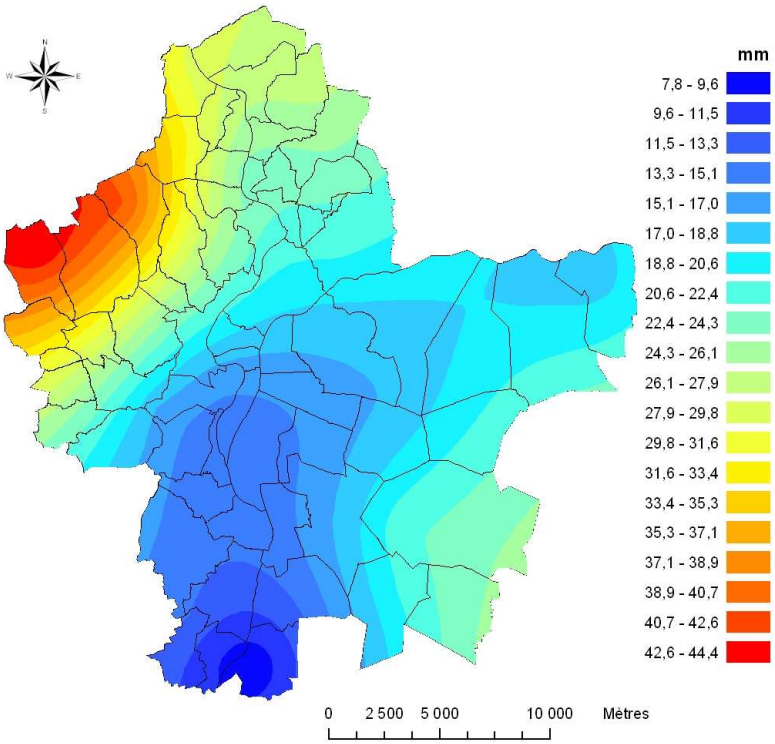
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
22/09/2001 18:54	25,9	29,5	10,7



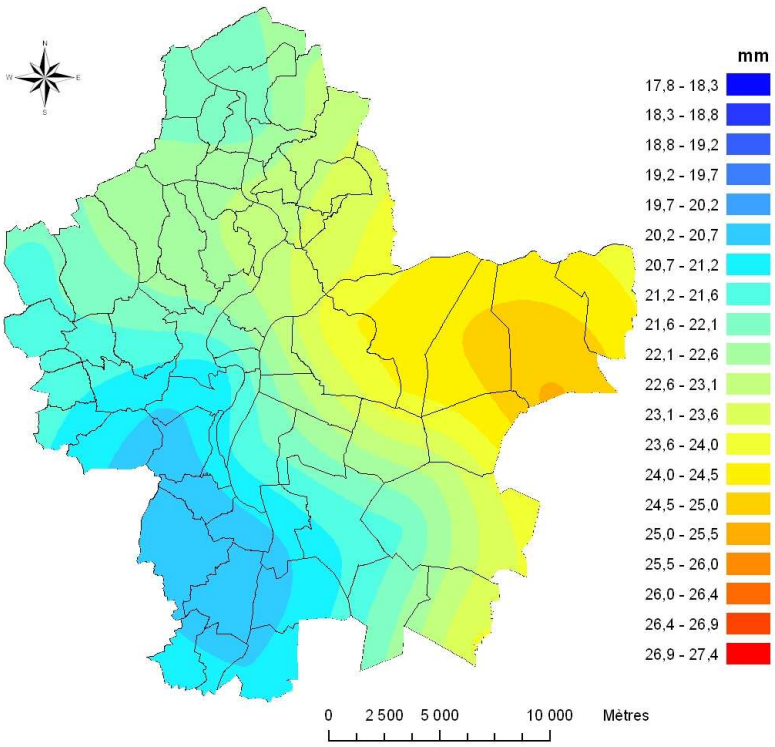
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
28/09/1991 20:00	76,1	29,2	24



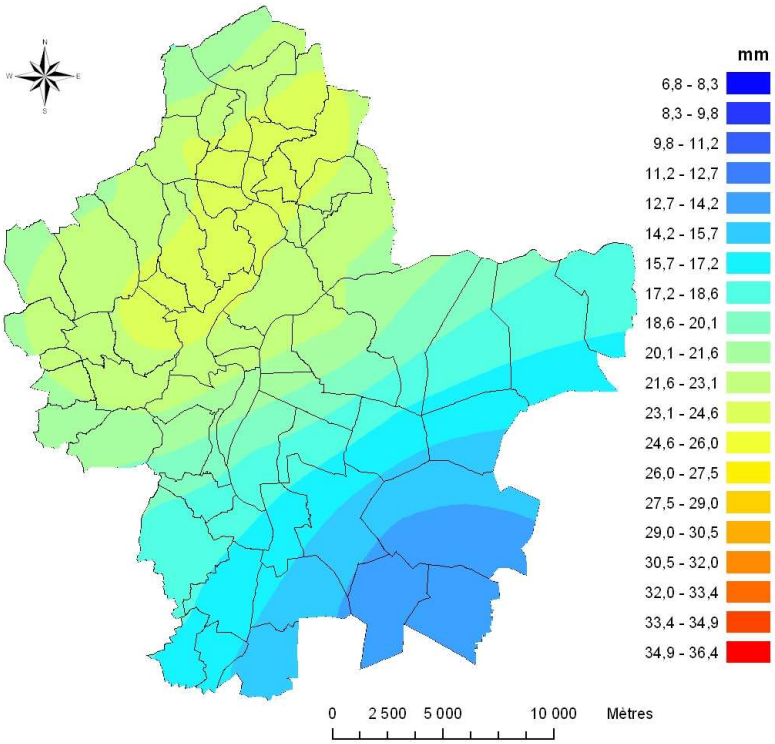
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
16/07/2002 01:36	21,9	28,8	24,7



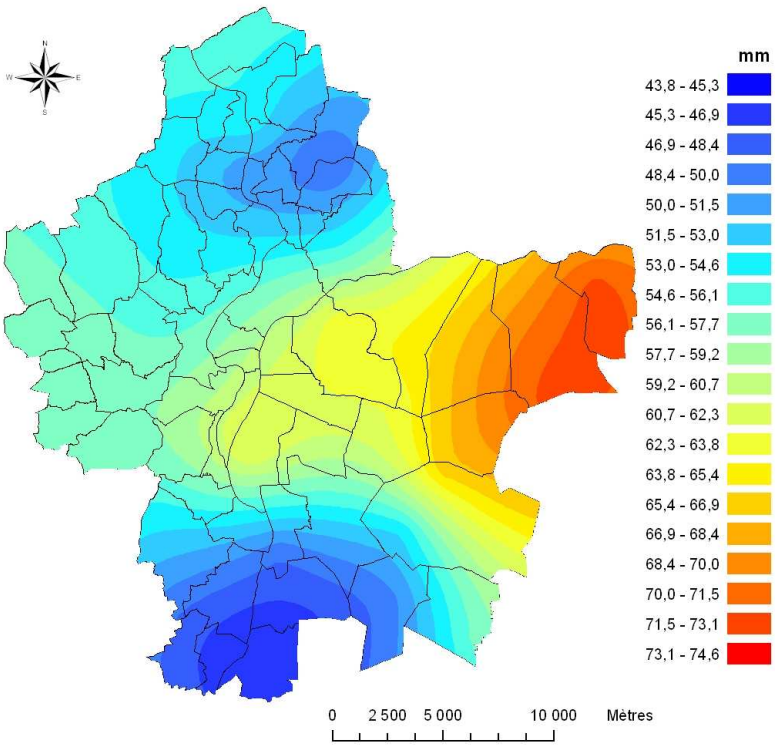
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
29/09/1988 11:00	17,4	28,7	22



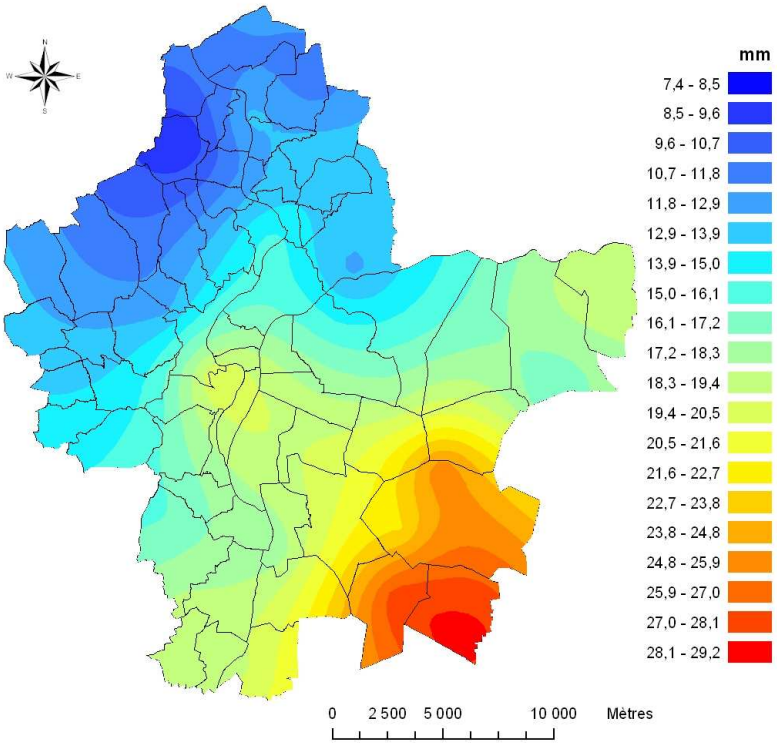
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
10/05/1989 11:54	16,8	28,6	46



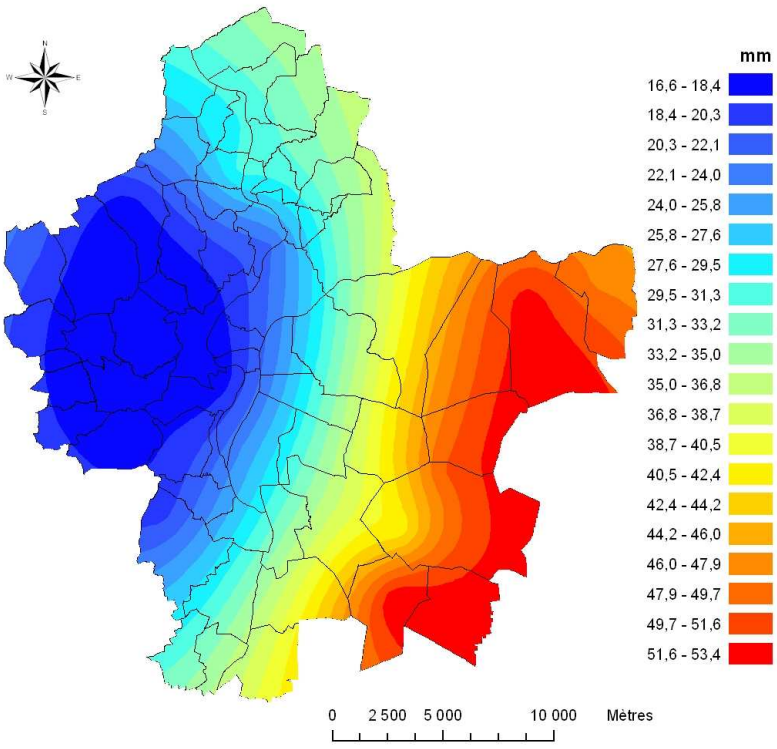
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
21/06/1997 14:00	54,7	27,1	38,7



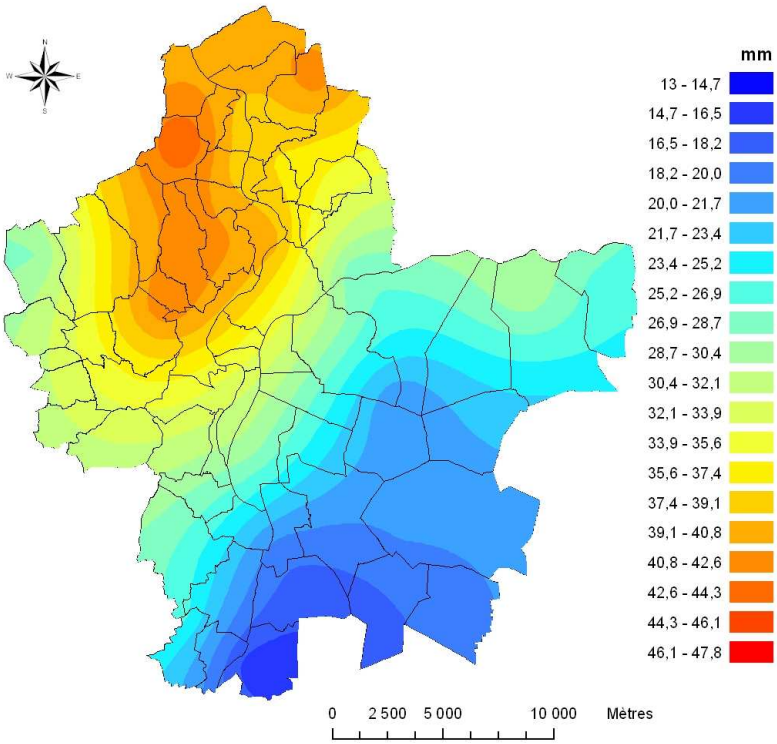
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
25/11/1996 06:24	16,9	27	8



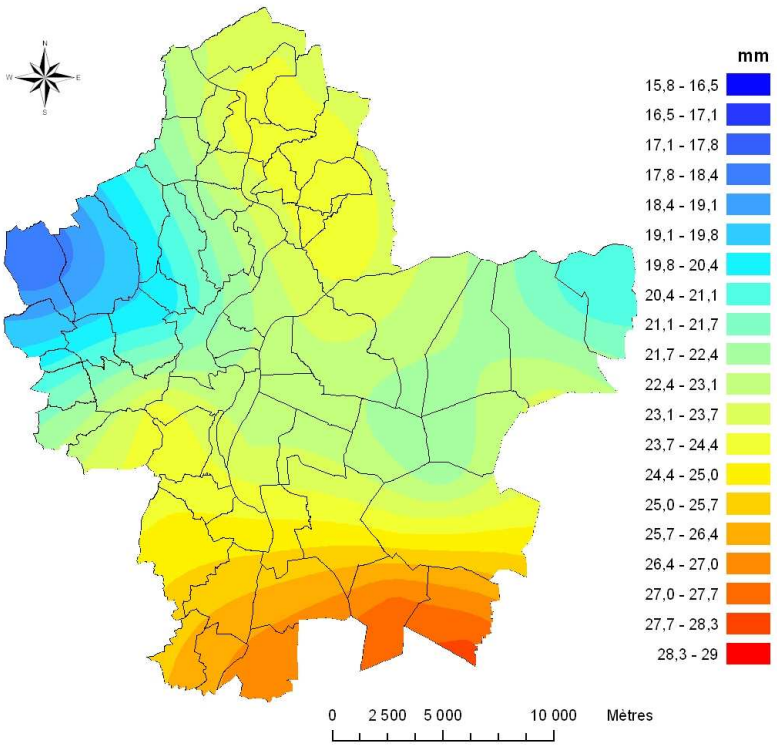
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
16/10/2002 16:54	34,1	26,6	59,3



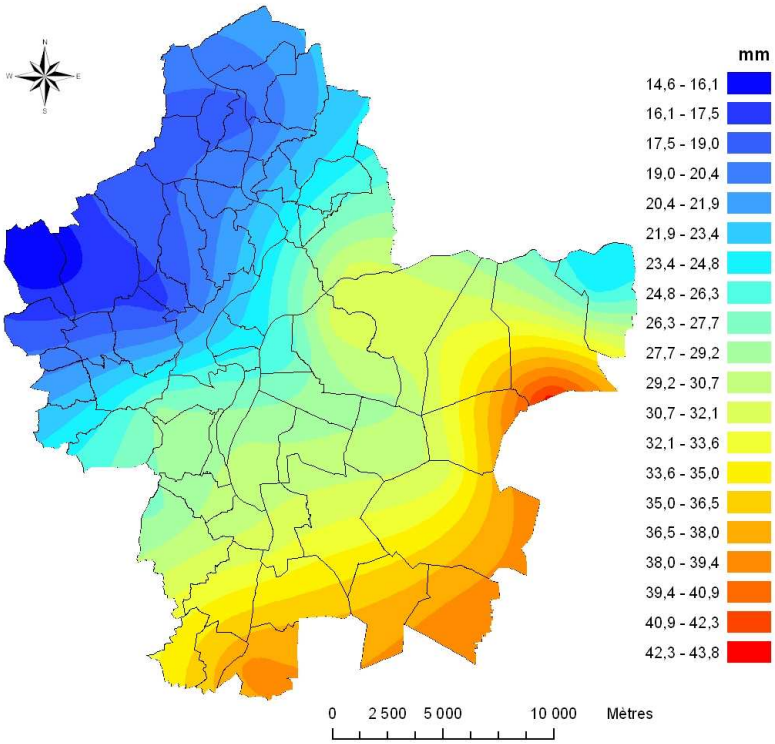
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
24/10/1999 13:36	29,2	25,6	47,3



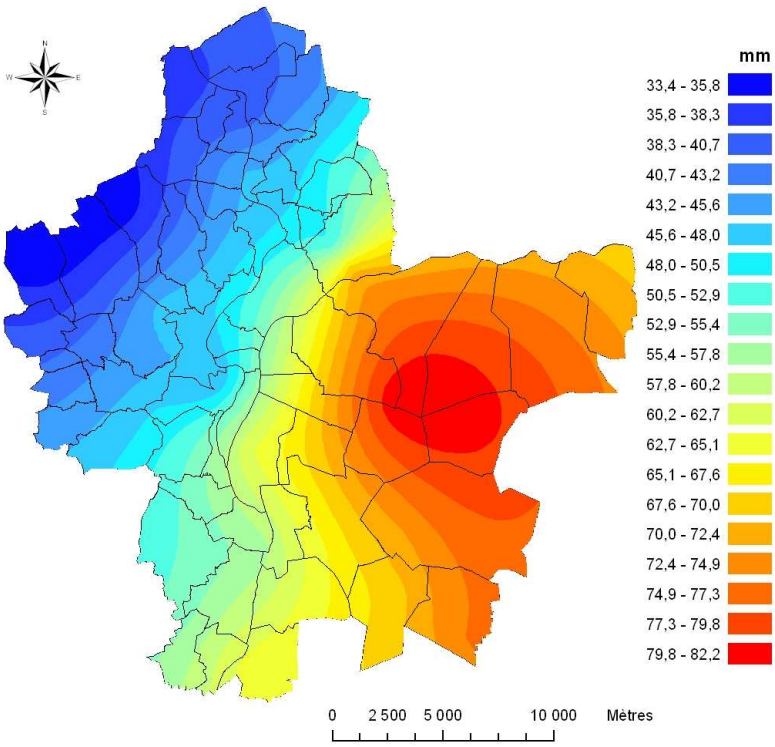
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
28/10/1990 20:18	21	25,2	10



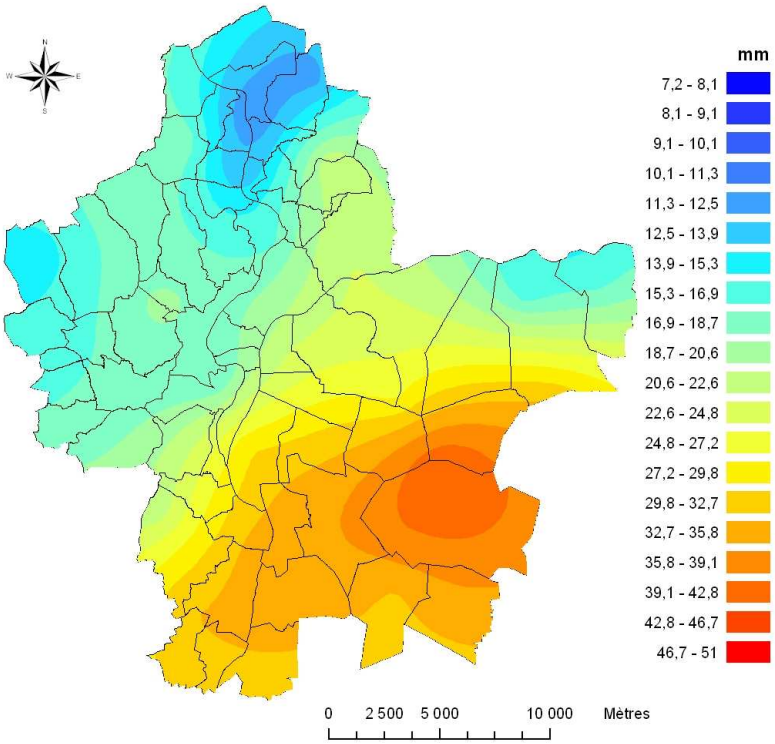
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
20/11/1990 21:06	11,2	25,2	4



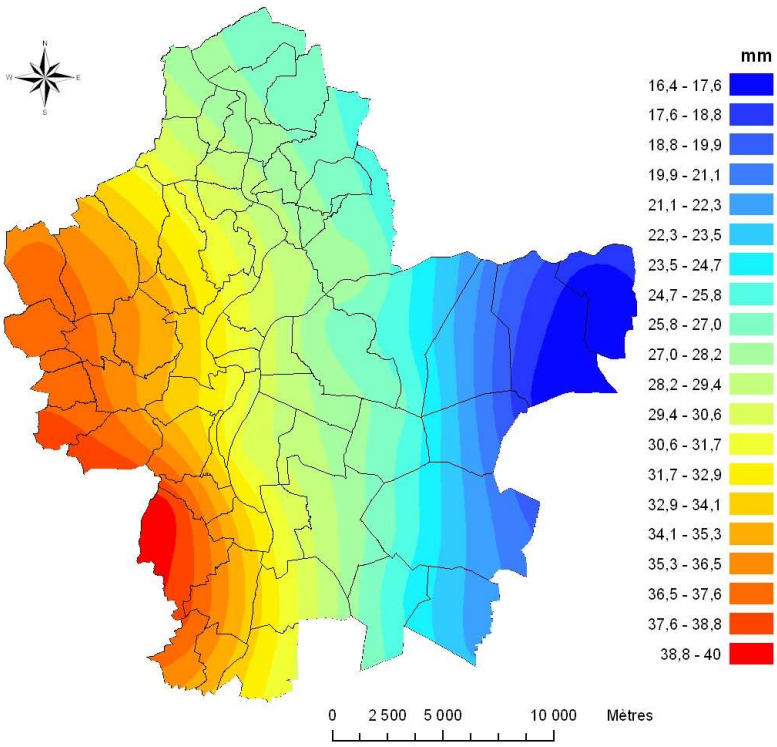
Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
10/10/1988 23:24	44,8	25,1	11,3



Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
10/06/1992 14:30	23,8	25,1	64,7

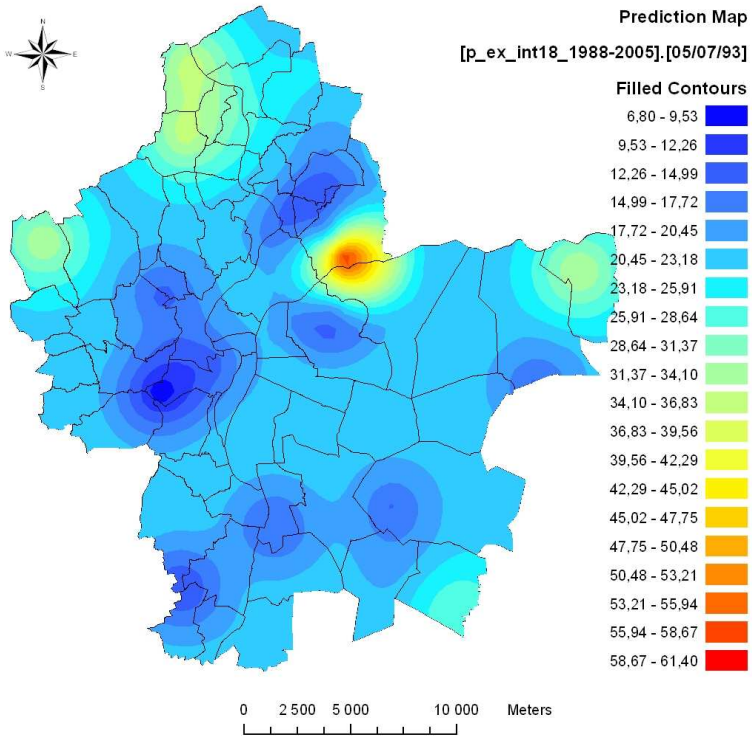


Pluie	H.totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
18/09/1995 07:54	27,5	24,8	8

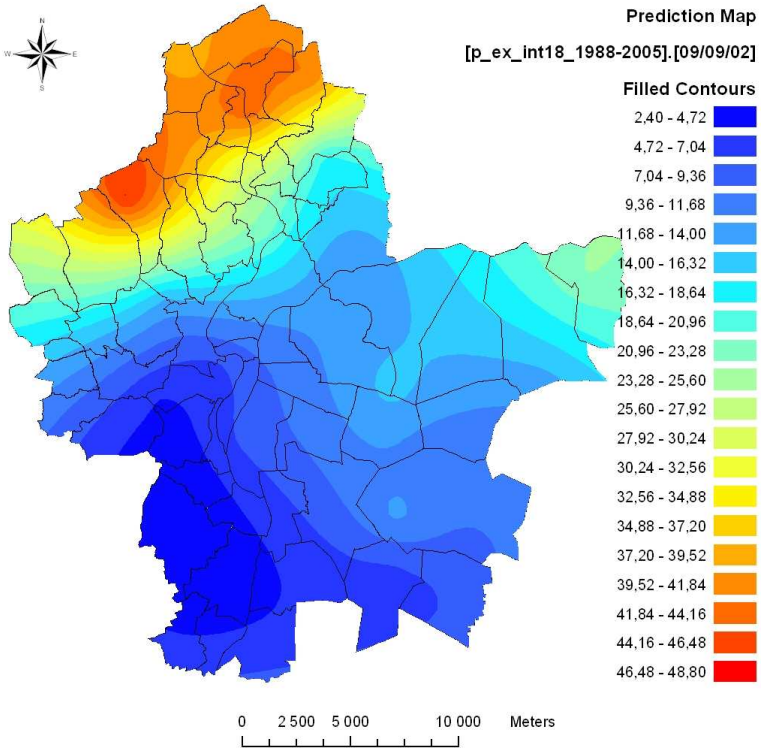


Annexe 6 : Interpolation des épisodes remarquables en terme d'intensité moyenne maximale en 18 minutes (krigeage ordinaire)

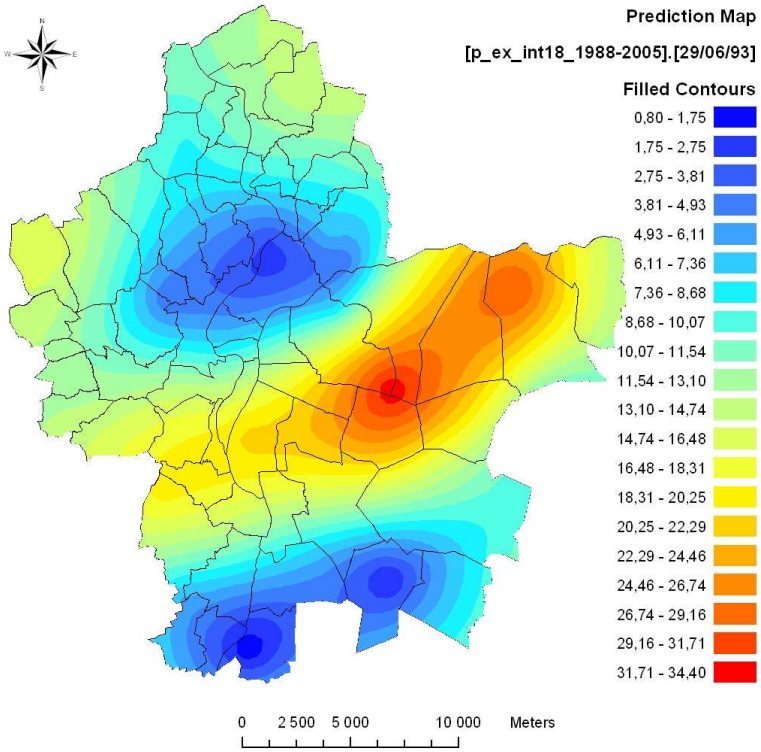
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
05/07/1993 15:24	24	6,4	140,7



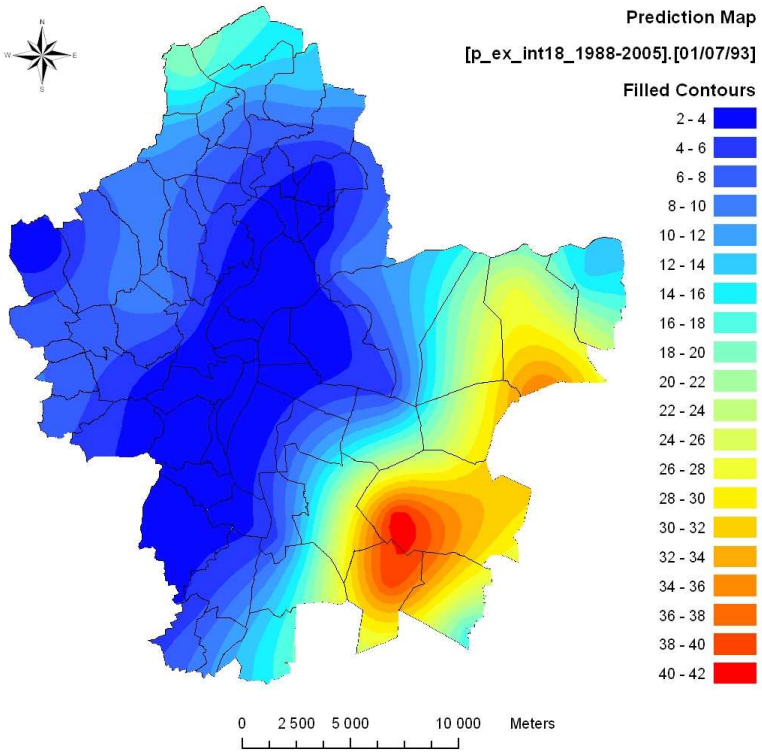
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
09/09/2002 15:12	16,6	8,1	113,3



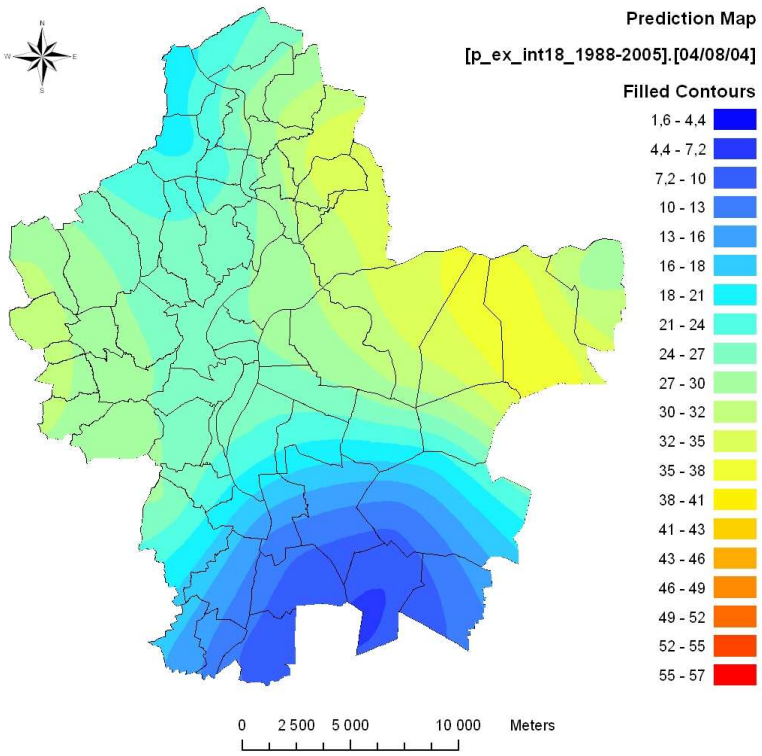
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
29/06/1993 15:06	11,8	1,3	112,7



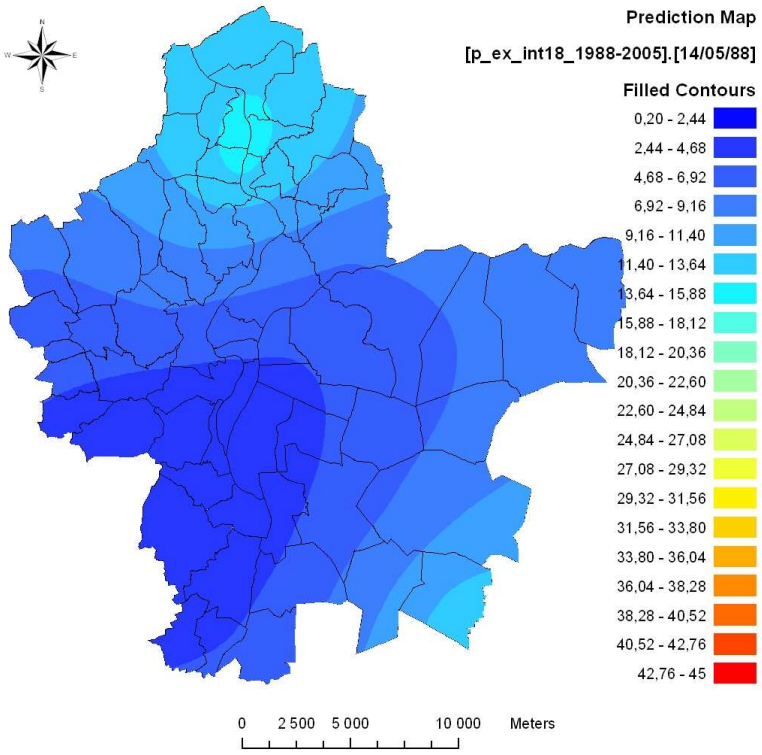
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
01/07/1993 15:18	13,1	1,9	112



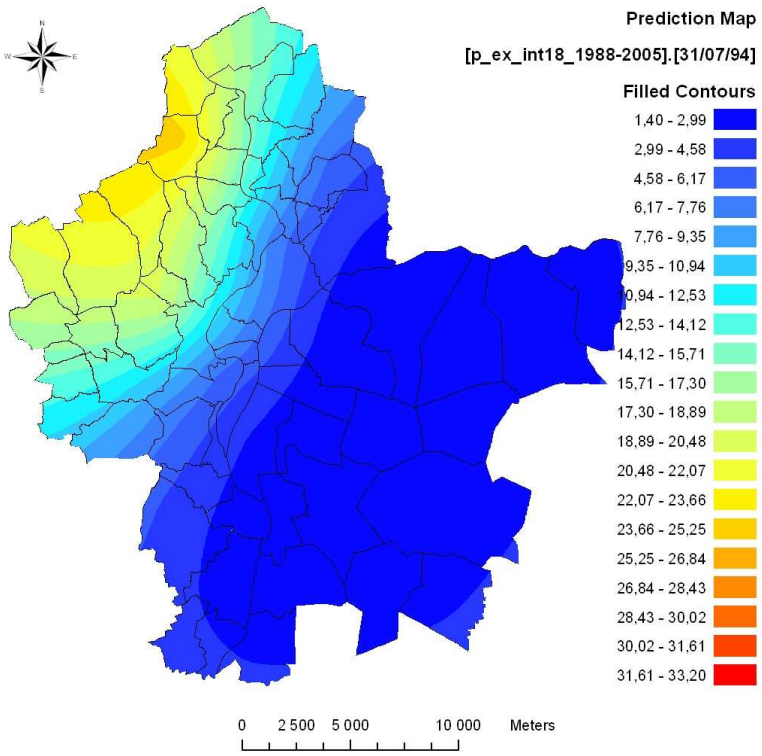
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
04/08/2004 17:06	24,9	4	111,3



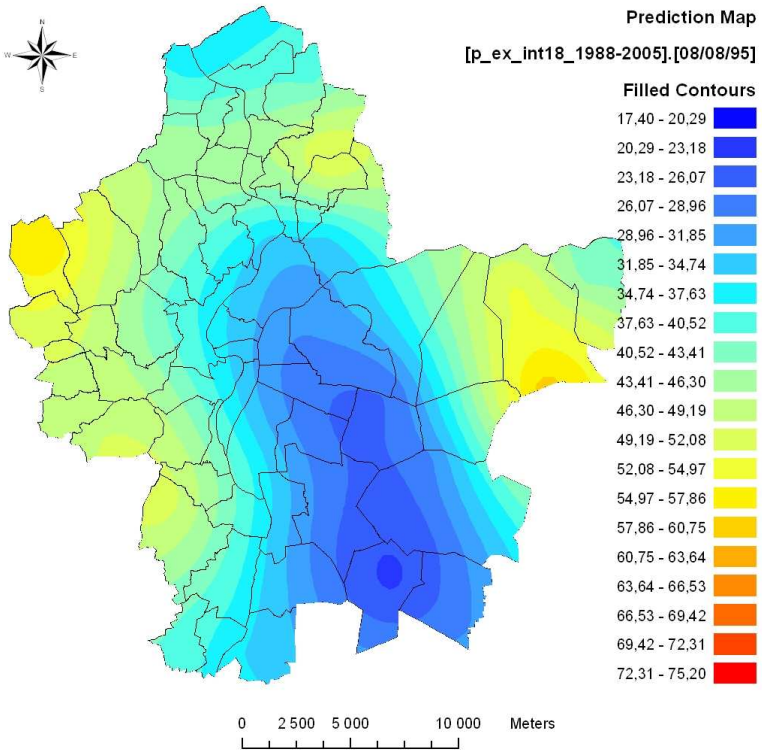
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
14/05/1988 22:06	6,5	1,6	111,3



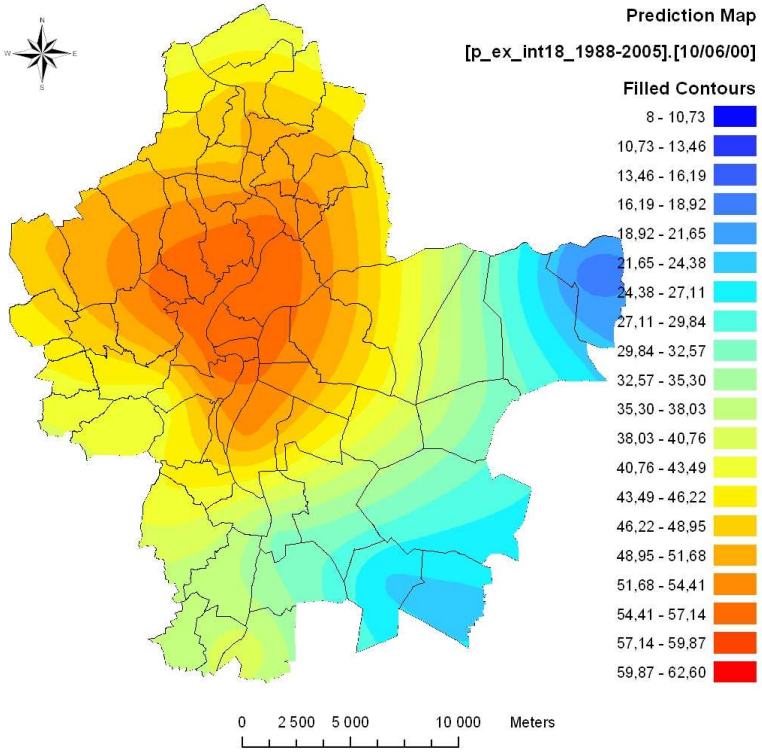
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
31/07/1994 20:36	8	3,6	108,7



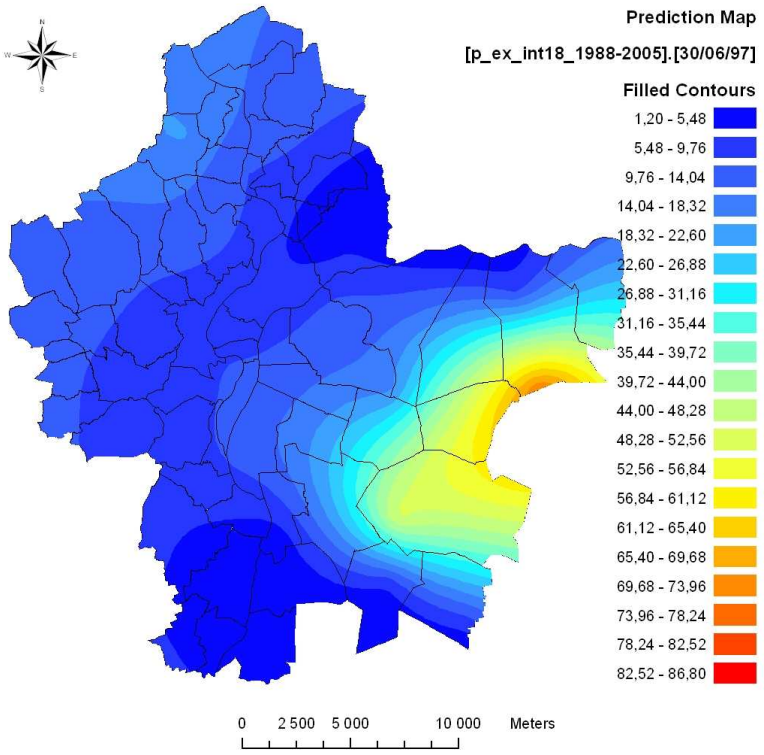
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
08/08/1995 04:36	42,2	17,3	108



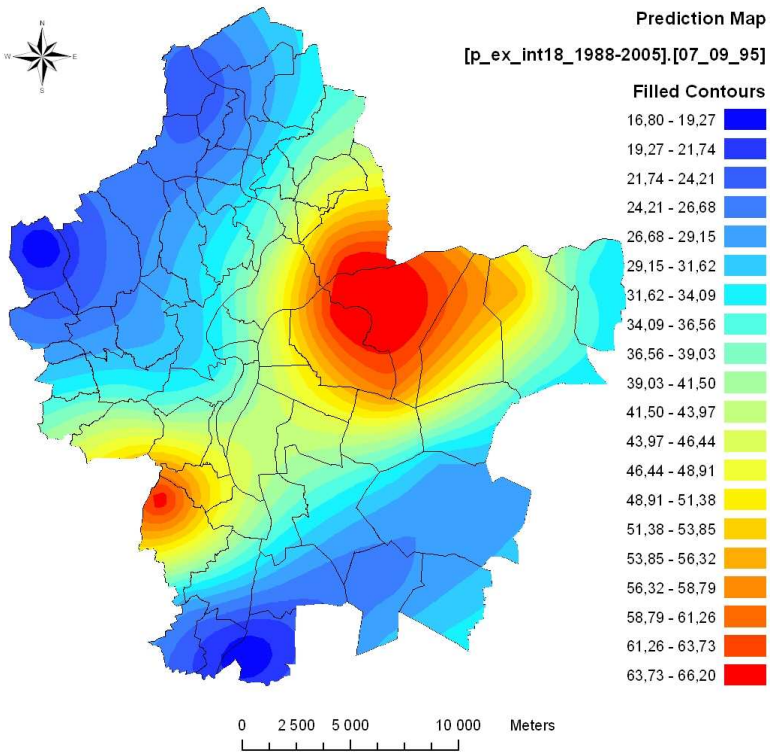
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
10/06/2000 18:30	39,7	6,8	104



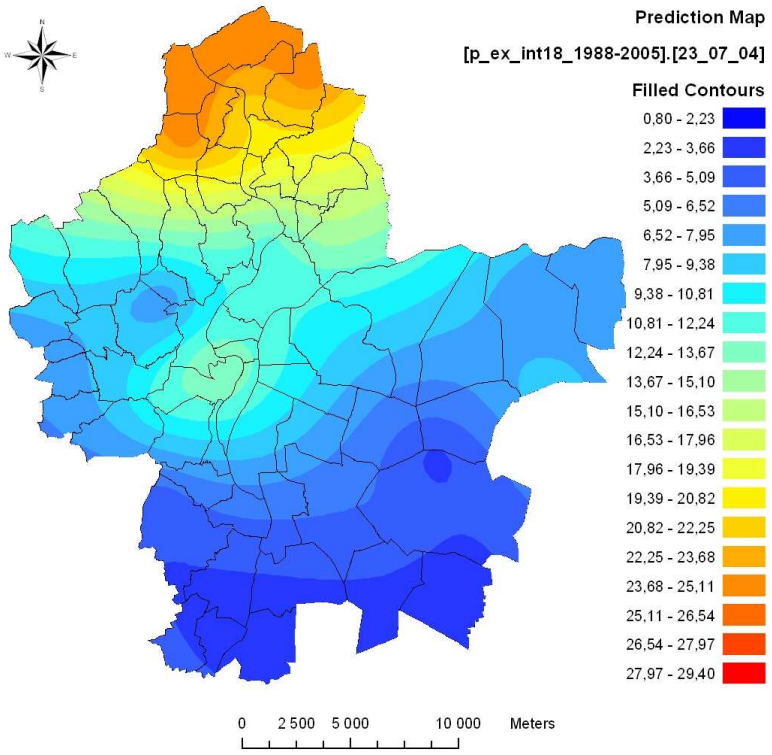
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
30/06/1997 12:42	16,2	7,1	98



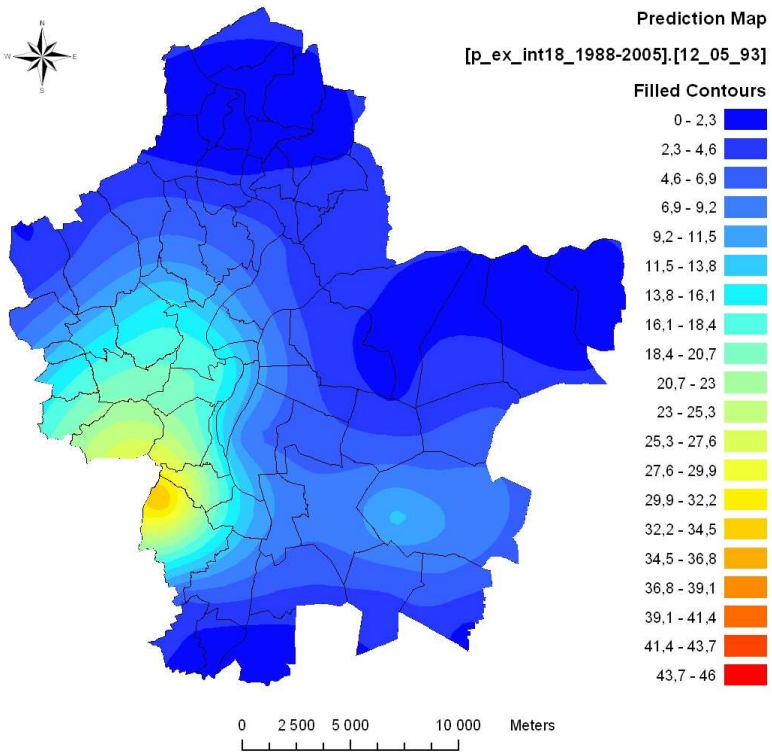
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/09/1995 09:00	37	7,9	95,3



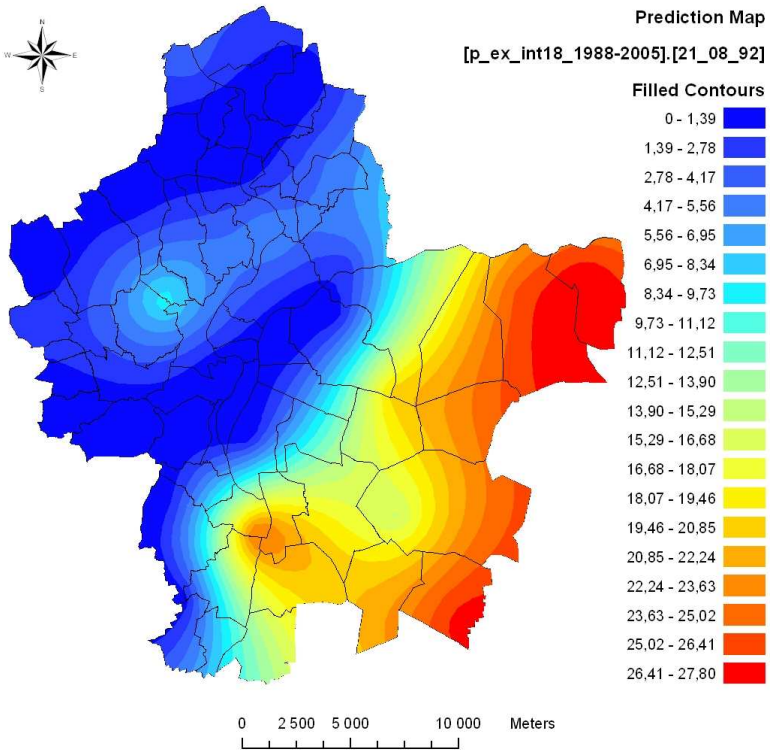
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
23/07/2004 07:06	9,7	1	92



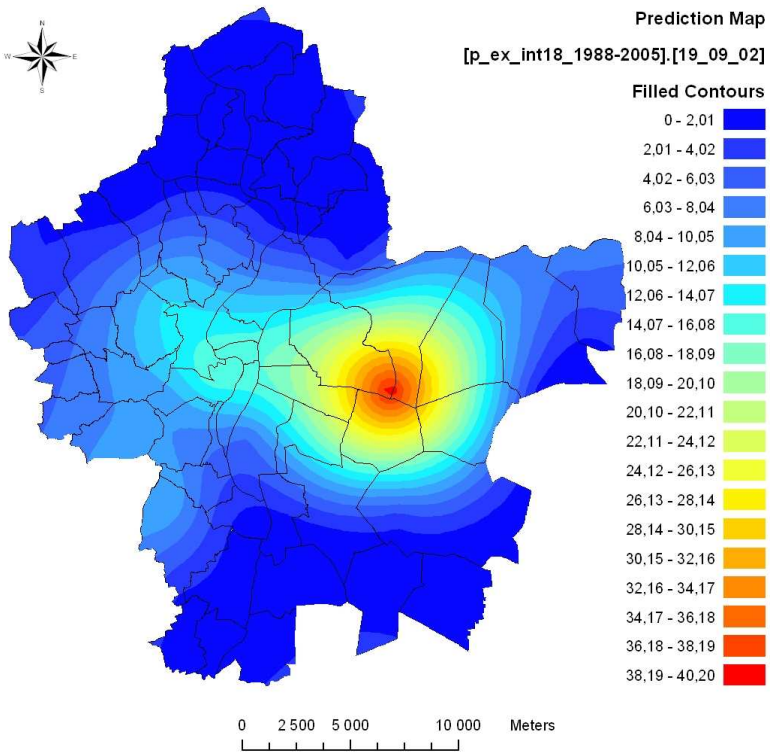
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/05/1993 12:06	6,9	2,7	92



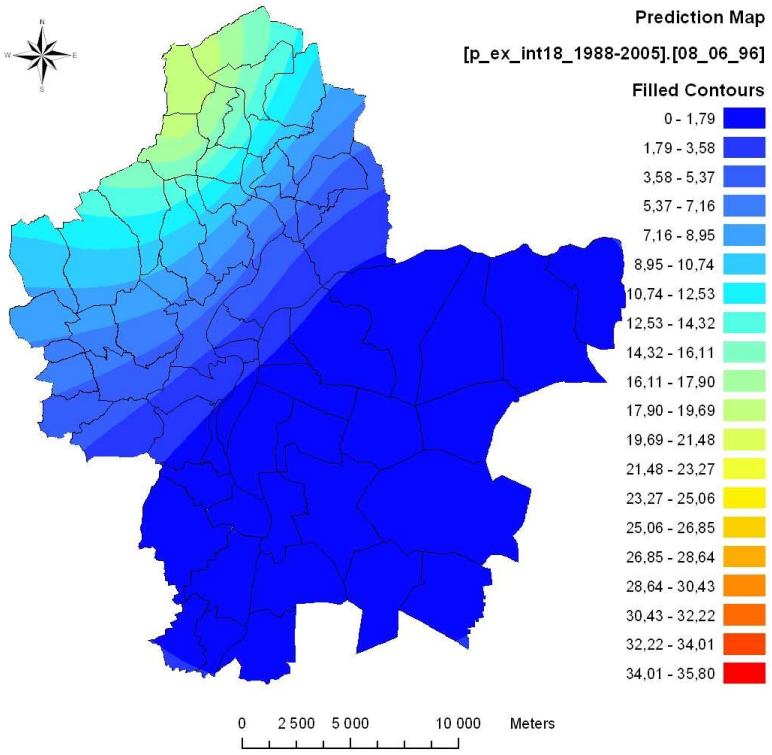
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
21/08/1992 16:12	9,8	1,7	91,3



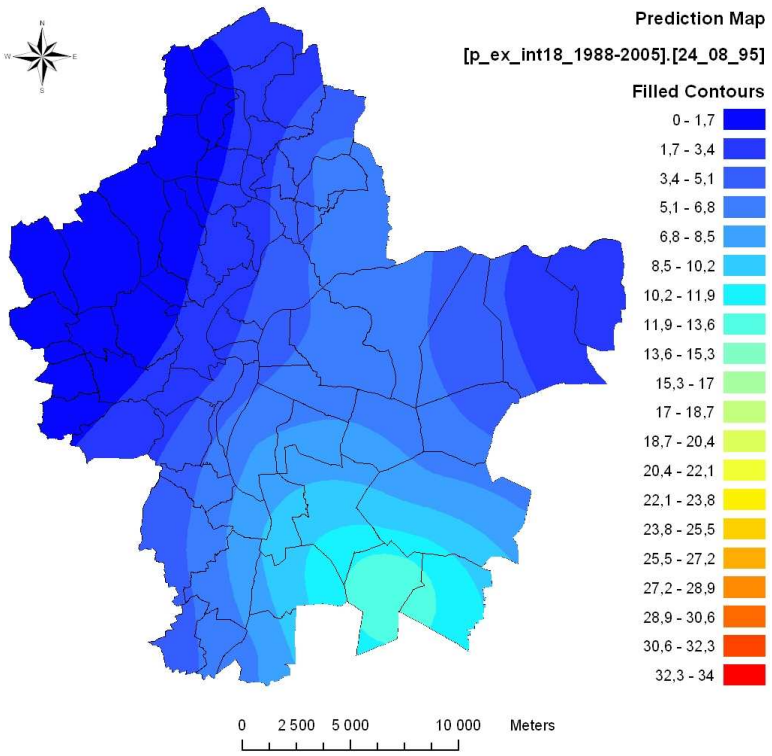
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
19/09/2002 15:06	5,7	2,3	90



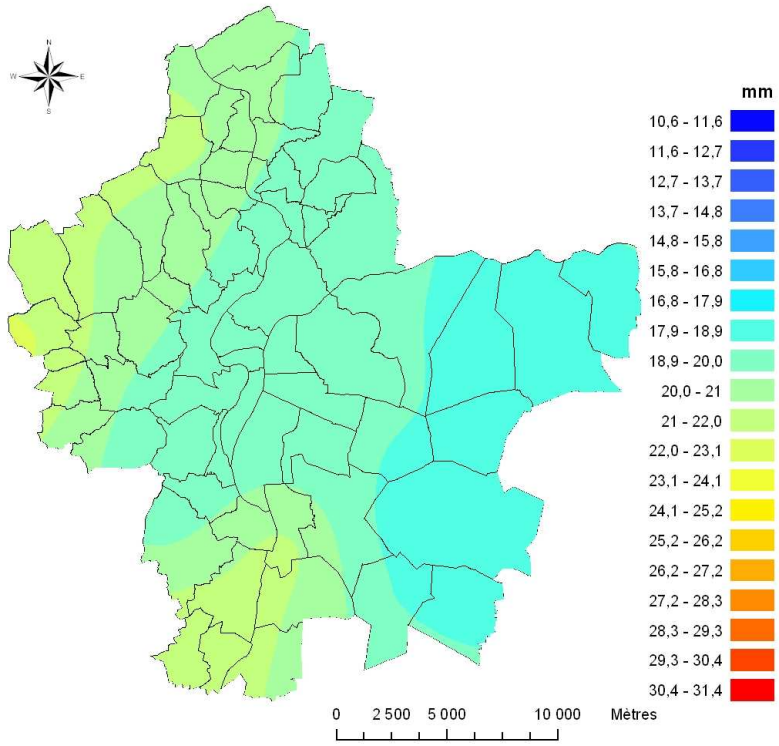
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
08/06/1996 17:24	4,8	1,1	89,3



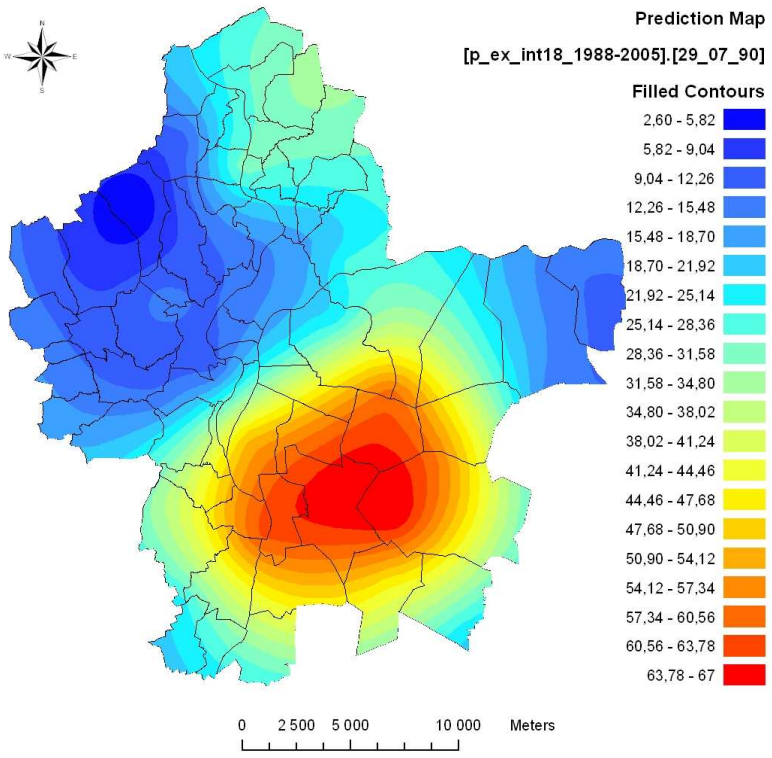
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
24/08/1995 13:36	4,7	1,1	88



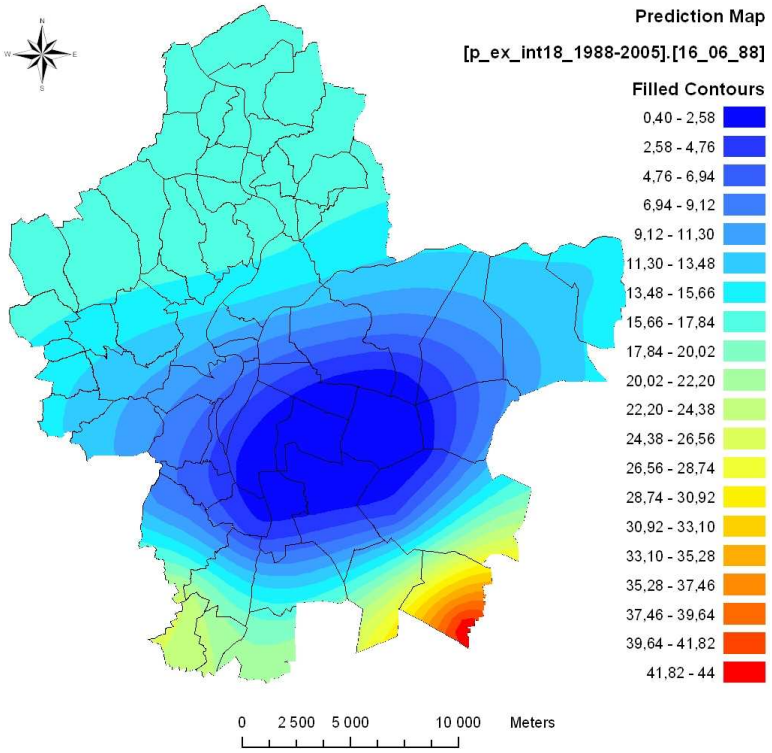
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
29/07/2005 12:30	18,7	11,2	87,3



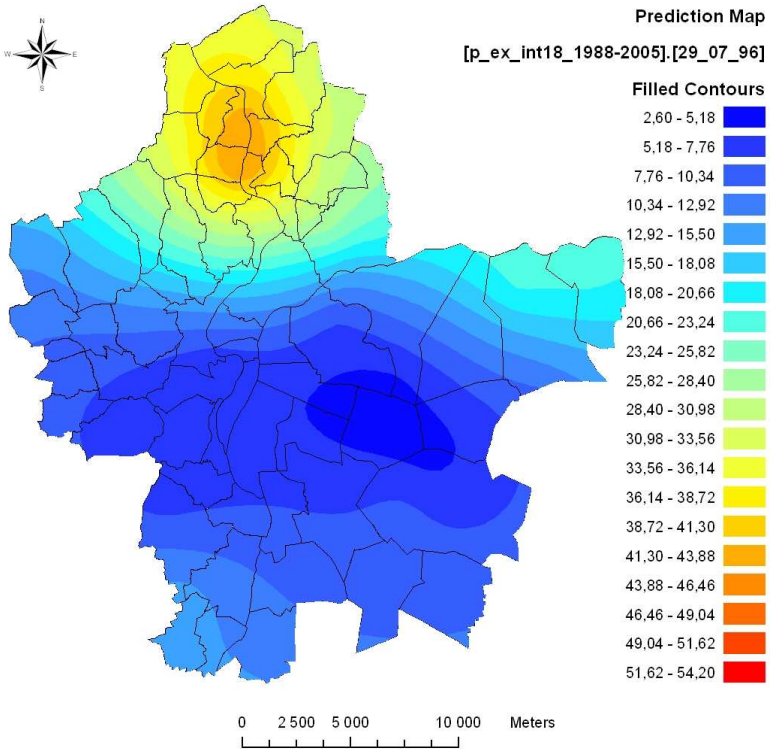
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
29/07/1990 14:06	23,5	3	86,7



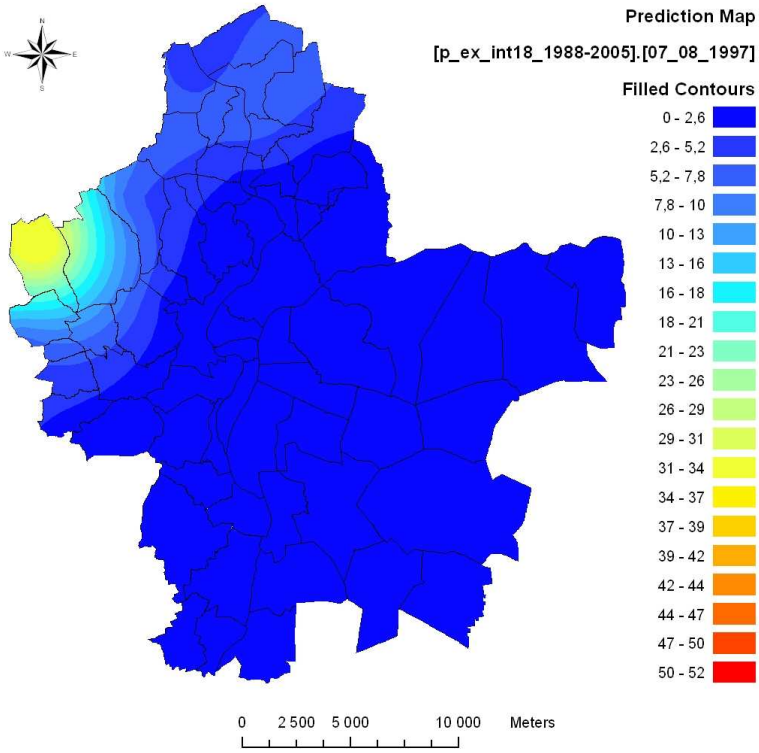
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
16/06/1988 16:12	5,8	4,1	86



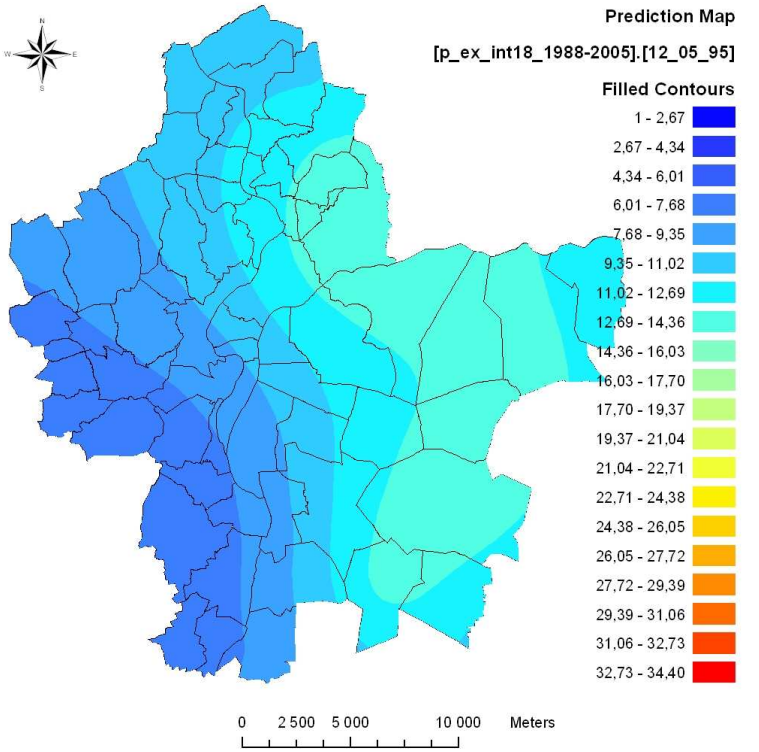
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
29/07/1996 20:36	16,1	6,2	84,7



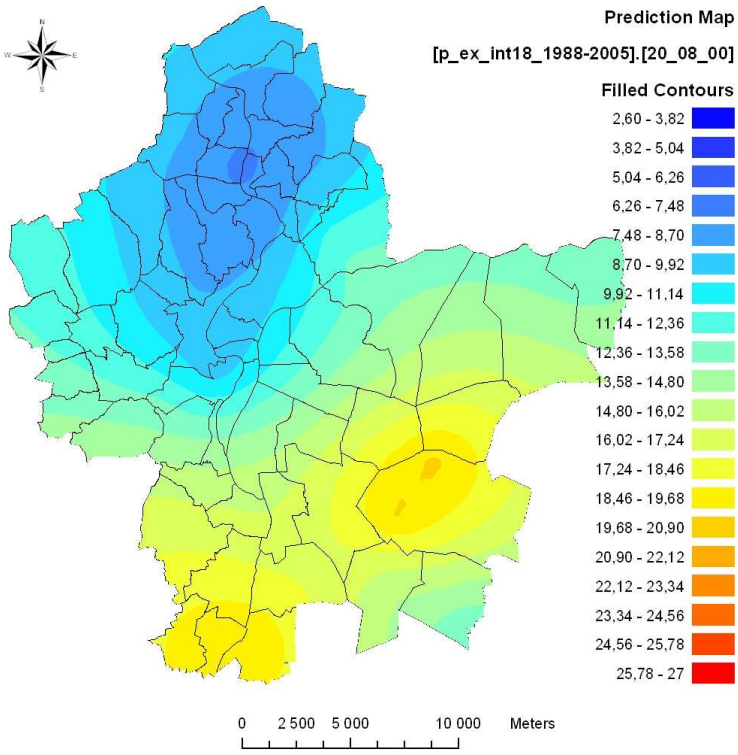
Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
07/08/1997 12:12	4,2	1,3	84



Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
12/05/1995 15:18	10,4	12	83,3

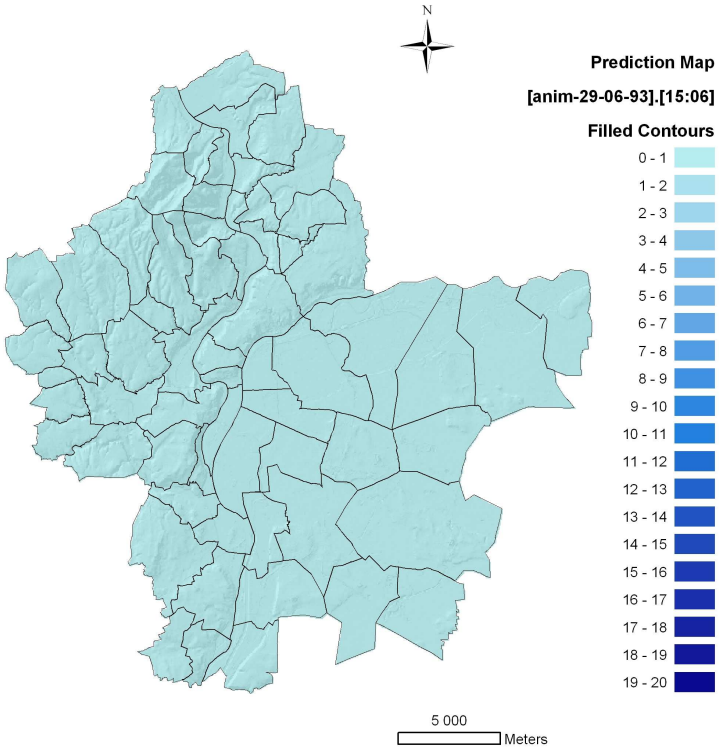


Pluie	H. totale (mm)	Durée (h)	Imax18 (mm/h)
20/08/2000 20:18	13	4,3	82

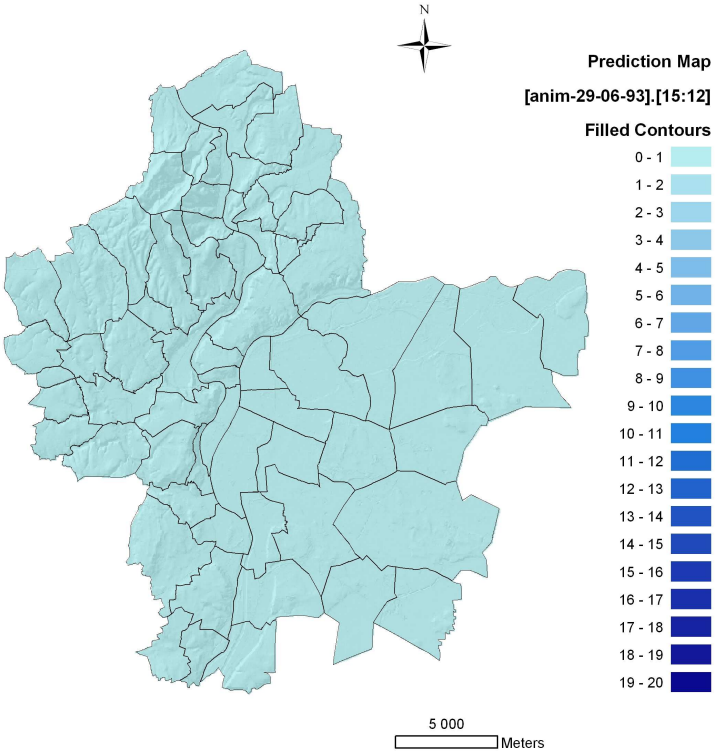


Annexe 7 : Interpolation de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993 par pas de temps de 6 minutes (krigeage ordinaire)

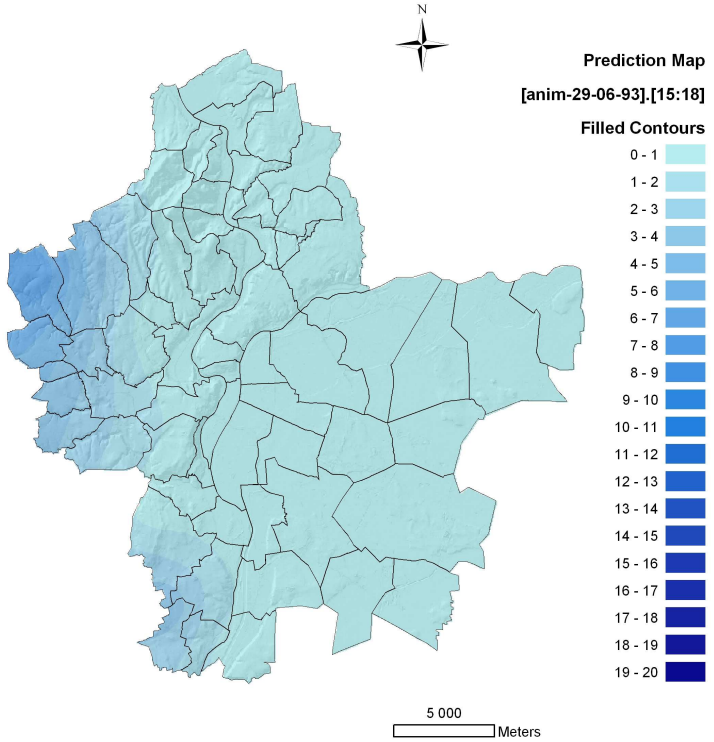
15h06



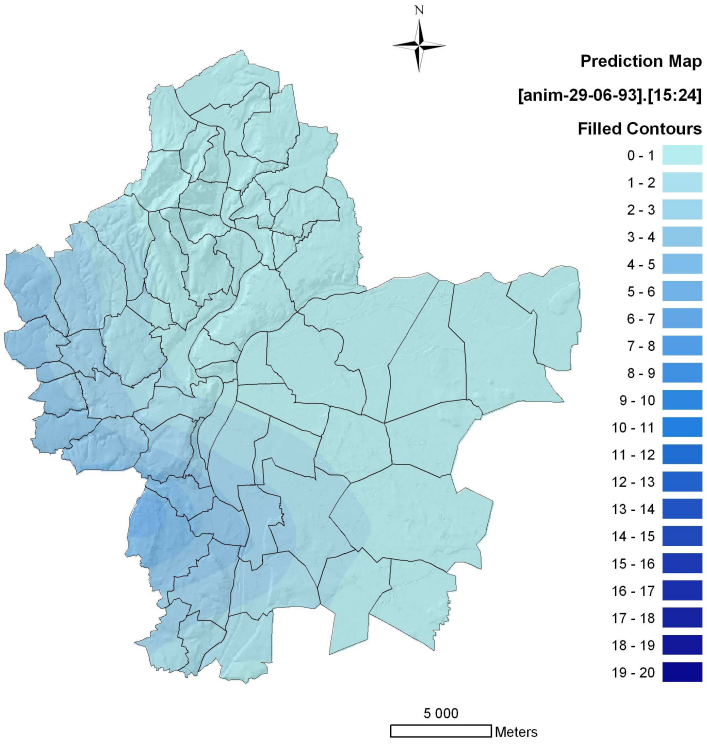
15h12


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:12]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

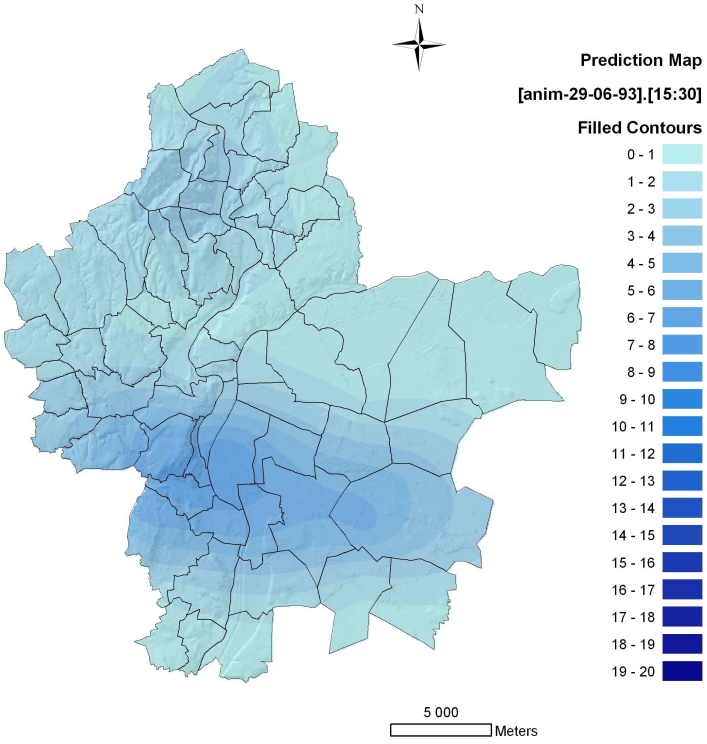
15h18


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:18]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

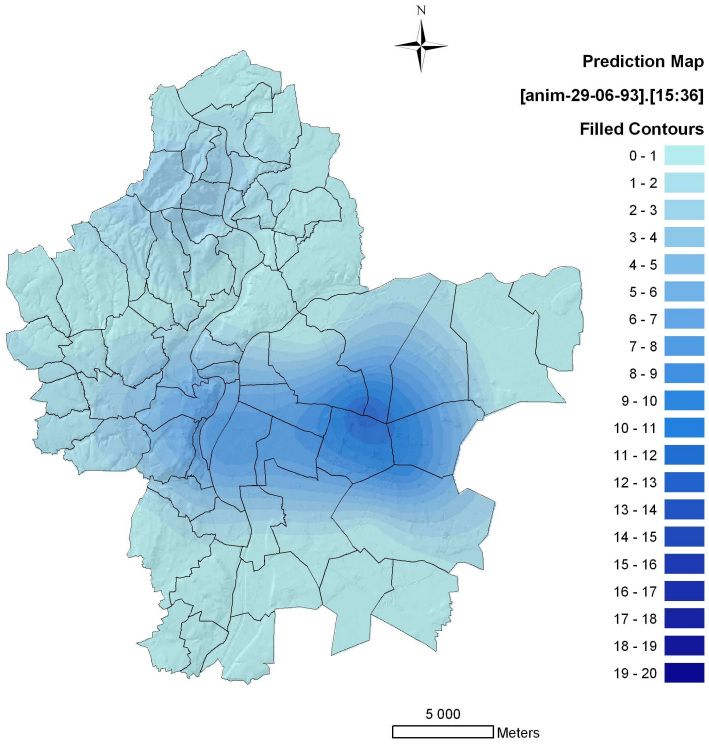
15h24


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:24]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

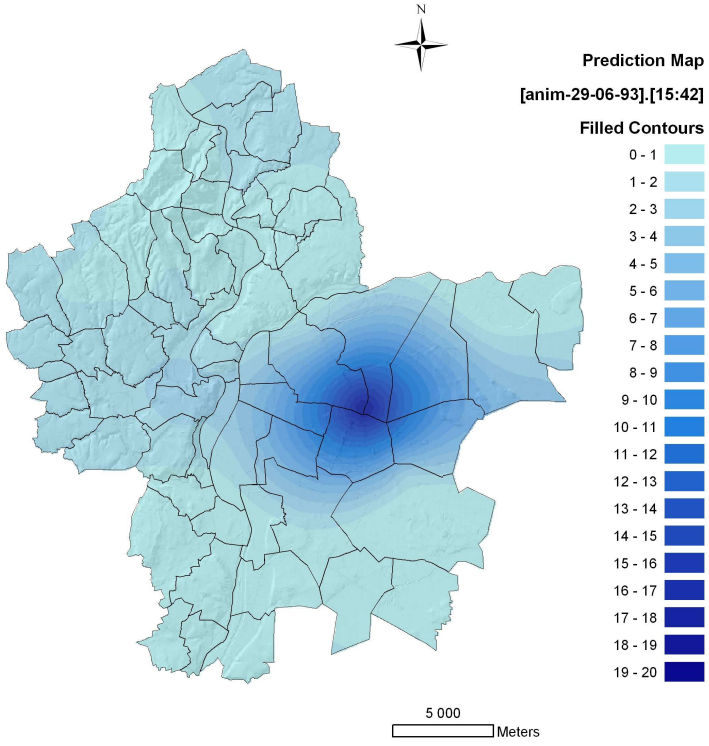
15h30


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:30]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

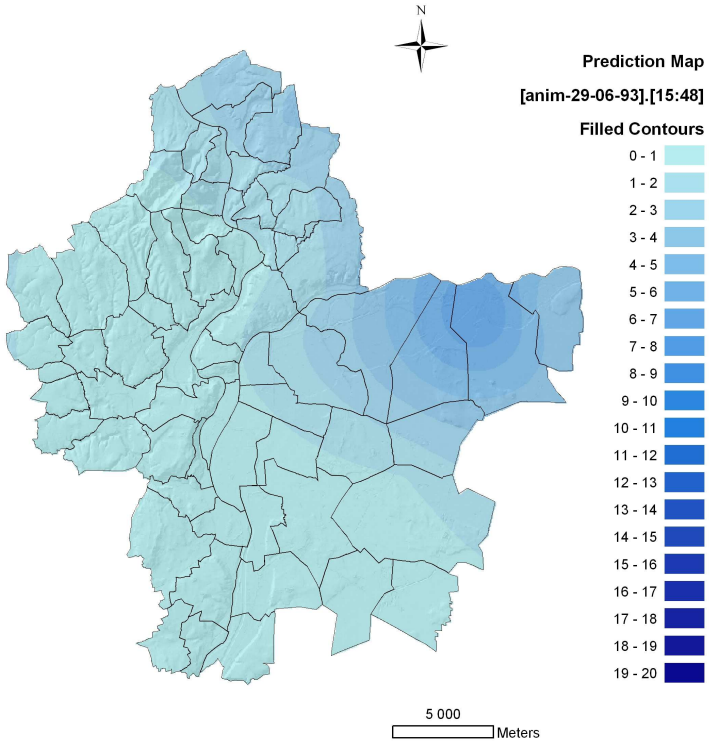
15h36


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:36]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

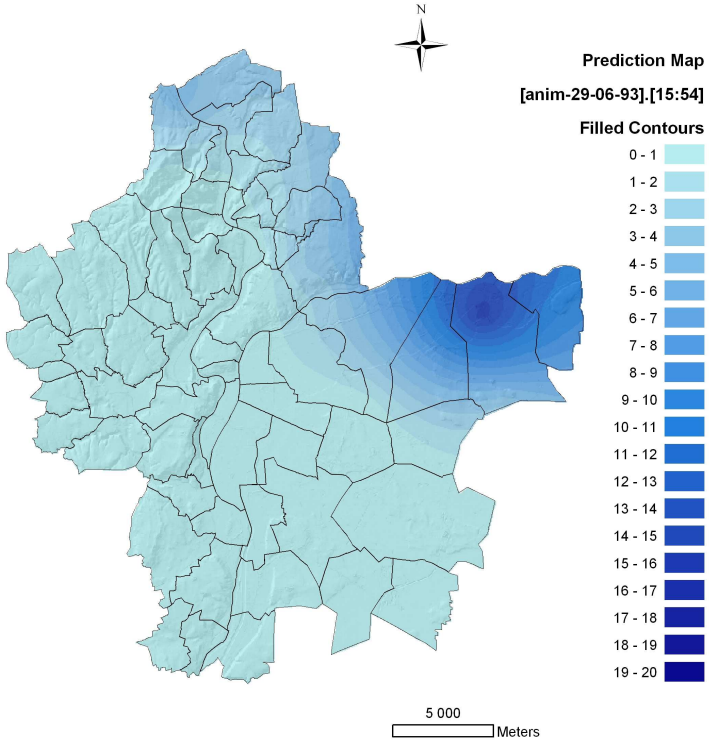
15h42


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:42]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

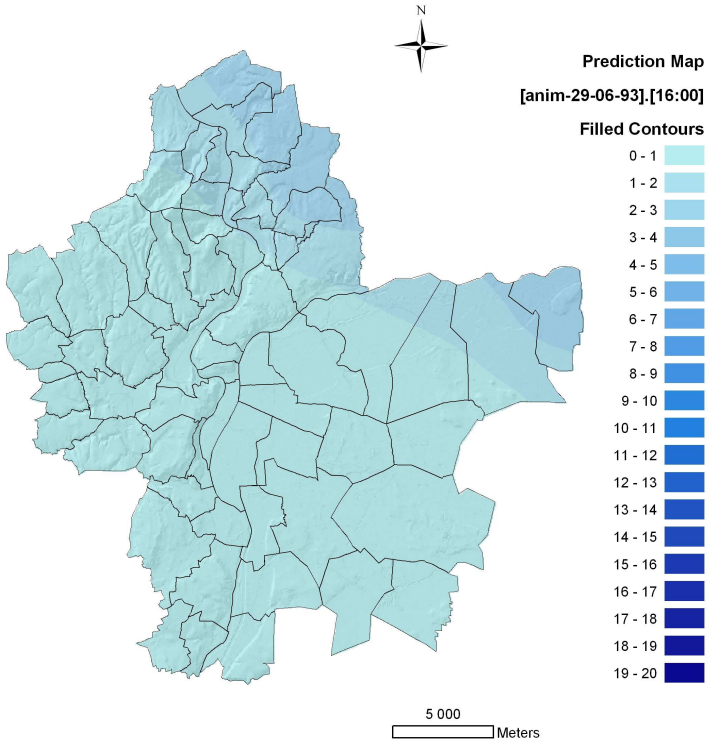
15h48


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:48]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

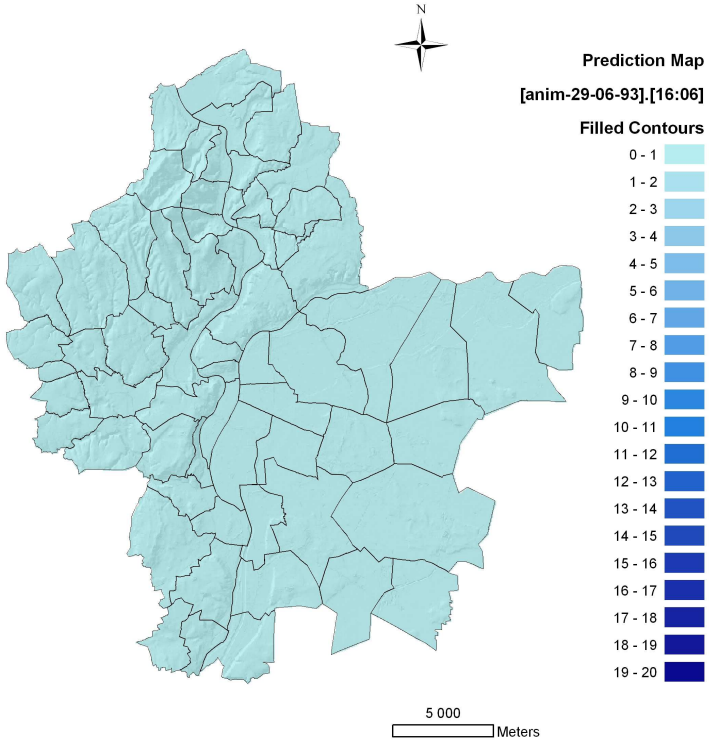
15h54


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[15:54]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

16h00


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[16:00]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

16h06


N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[16:06]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

16h12

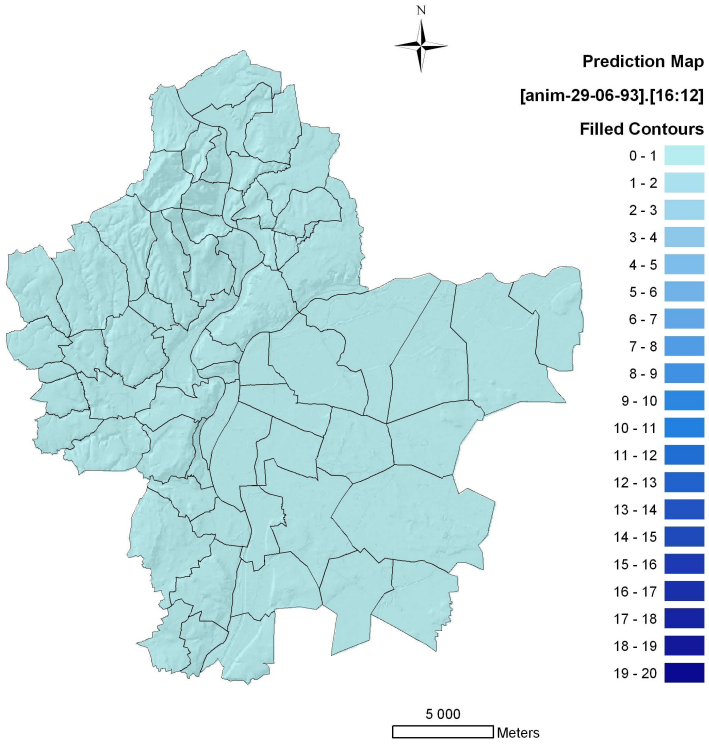

N
Prediction Map
[anim-29-06-93].[16:12]
Filled Contours
0 - 1
1 - 2
2 - 3
3 - 4
4 - 5
5 - 6
6 - 7
7 - 8
8 - 9
9 - 10
10 - 11
11 - 12
12 - 13
13 - 14
14 - 15
15 - 16
16 - 17
17 - 18
18 - 19
19 - 20
5 000
Meters

Table des matières

Remerciements **3**

Résumé **6**

Abstract **8**

Sommaire **10**

Introduction générale **12**

Cadre thématique du risque d'inondation en milieu urbain 13
Un projet de thèse s'inscrivant dans un programme scientifique au service du Grand Lyon 13
Rappel essentiel sur quelques éléments des concepts du risque 16
La notion de risque : une notion polysémique 16
L'aléa : la notion longtemps uniquement prise en compte dans le risque 18
La vulnérabilité : une prise de conscience récente et nécessaire 19
Des enjeux vulnérables à l'inondation 20
Les différentes formes d'inondation 21
Choix de la zone d'étude et contexte administratif 22
Un cadre géographique d'étude conditionné par le contexte administratif 22
Une topographie qui influence le réseau hydrographique 26
Une subdivision topographique en trois ensembles distincts 26
Un réseau hydrologique contrasté 27
La nécessité de recourir à un territoire plus vaste 27
Résultats des études antérieures : un apport réel mais une connaissance de la pluie encore partielle 28
Des échelles d'études inadaptées à la problématique de la thèse 29
Analyse des situations pluviogènes 29
Analyse de la répartition spatio-temporelle des pluies : des pas de temps trop longs . 29
Des séries de données courtes 30
Un radar météorologique inexploité 30
Des moyens technologiques limités 31
Synthèse et apport des études antérieures sur la répartition spatio-temporelle des précipitations lyonnaises 31
Objectifs, partenariats et structuration de la thèse 32

Chapitre 1 Un réseau de mesure dense et fiable pour une caractérisation fine de l'aléa pluvial lyonnais **36**

Partie 1 : Des mesures au sol qui nécessitent le recours à l'interpolation spatiale **37**
1. Exploitation d'un réseau de mesure au sol : principes et instrumentation 39

1.1 Méthodes de mesure et principes de fonctionnement 39
1.1.1 Dispositifs recueillant les précipitations 39
1.1.2 Les dispositifs ne recueillant pas les précipitations 44
1.2 Les erreurs de mesure potentielles des capteurs pluviométriques au sol 46
1.2.1 Les erreurs liées au site 47
1.2.2 Les erreurs liées à la captation des précipitations 50
1.2.3 Les erreurs liées à la précision du capteur..... 54
1.2.4 Les erreurs liées à des facteurs externes..... 62
1.3 Le réseau de mesure au sol de la communauté urbaine de Lyon 62
1.3.1 Capteurs utilisés 63
1.3.2 Rapatriement de données 64
1.3.3 Répartition du réseau dans l'agglomération..... 64
1.3.4 Critique et validation des données 68
1.3.5 Autres sources de données exploitables dans l'agglomération 69
2 La nécessité de l'interpolation spatiale des précipitations 70
2.1 Présentation des méthodes d'interpolation spatiale 71
2.1.1 Principes de base de l'interpolation spatiale et de la variable régionalisée . 71
2.1.2 Les méthodes déterministes 72
2.1.3 Les méthodes stochastiques 78
2.1.4 Les autres méthodes 88
2.2 Evaluation des méthodes d'interpolation spatiale sur le Grand Lyon..... 90
2.2.1 Trois échantillons de pluies analysés 90
2.2.2 Principe de l'évaluation par validation croisée 91
2.2.3 Résultats de l'évaluation et observations 92
Synthèse de la partie : des méthodes d'interpolation à l'efficacité comparable 97

Partie 2 : Caractérisation fine de l'aléa pluvial du Grand Lyon à l'aide du réseau de mesure au sol..... 98
1. De plus fortes hauteurs d'eau sur l'est lyonnais lors des longues périodes.....99
1.1 Constat de la variabilité spatiale et temporelle à l'échelle annuelle..... 99
1.2 Constat de la variabilité pluvieuse aux échelles saisonnières et mensuelles..... 101
2. Des tendances communes dans les répartitions spatio-temporelles des cumuls des épisodes pluvieux.....107
2.1 Identification d'un épisode pluvieux..... 108
2.2 Caractérisation et sélection des pluies remarquables lyonnaises 109
2.3 Une distribution des pluies remarquables centrée sur les mois d'automne..... 113
2.4 Une répartition spatiale aléatoire des pluies remarquables? 116
2.4.1 En termes de hauteur d'eau totale précipitée 116
2.4.2 En termes de durée 119
2.4.3 En termes d'intensité maximale en 18 minutes..... 120
2.5 L'analyse variographique pour la mise en évidence de tendances significatives dans la distribution des pluies 125
2.5.1 Etude de cas de l'anisotropie de la hauteur d'eau de l'événement du 07 septembre 1995 126
2.5.2 Résultats de l'anisotropie des épisodes remarquables..... 128
2.6 Analyse descriptive de la dynamique spatiale et temporelle des épisodes 131
2.6.1 Etude de cas de la spatialisation à pas de temps fin de l'épisode pluvieux du 29 juin 1993..... 132
2.6.2 Résultats des interpolations à pas de temps fin et confrontation à l'analyse variographique..... 134

Synthèse de la partie : des distributions et des trajectoires significatives à l'échelle de l'épisode pluvieux 135

Chapitre 2 Le radar météorologique : un outil performant dont la qualité de mesure est à évaluer avant son utilisation dans la caractérisation de l'aléa pluvial 137

Partie 1 : Une qualité de mesure en constante progression pour une caractérisation fine des épisodes pluvieux 138

1. Principes de fonctionnement du radar météorologique et limites de la mesure 139
1.1 Principe de la mesure par radar 139
1.1.1 Emission 140
1.1.2 Rétrodiffusion 142
1.1.3 Passage du facteur de réflectivité au taux de pluie 143
1.2 Erreurs classiques de la mesure des précipitations par radar météorologique ... 143
1.2.1 Echos fixes 143
1.2.2 Masques 144
1.2.3 Propagation anormale 144
1.2.4 Effet du PVR à grande distance 145
1.2.5 Dépassement du faisceau et remplissage partiel 145
1.2.6 Effet de bande brillante 145
1.2.7 Atténuation de l'énergie du faisceau 146
1.2.8 Précipitations sous forme de virga 146
1.2.9 Biais lié à la relation Z-R 146
2 Des caractéristiques et des données qui dépendent de la localisation du radar 147
2.1 La localisation pénalisante du radar de Satolas 149
2.2 Le radar de Saint-Nizier d'Azergues : un endroit de mesure favorable 151
2.3 La complémentarité des types de données exploitées 153
2.3.1 Les données de réflectivité : des données brutes 153
2.3.2 Les lames d'eau : des données corrigées 155
3 Une qualité de mesure du radar en nette amélioration 162
3.1 La faible qualité de mesure du radar de Satolas 162
3.1.1 Le retour d'expérience de Météo-France 162
3.1.2 Etude de la journée du 22 septembre 1993 167
3.2 Une qualité de mesure qui bénéficie de la délocalisation à Saint-Nizier (période 2001 – 2006) 169
3.2.1 Analyse par simulation : mode opératoire 170
3.2.2 Analyse par simulation : résultats 175
3.2.3 Une analyse par données réelles concordante 178
4 Comparaison des valeurs du radar aux données au sol 192
4.1 Des comparaisons à différentes échelles d'études 192
4.1.1 Principe de la comparaison surfacique globale 192
4.1.2 Principe de la comparaison fine ponctuelle 193
4.2 Les résultats encourageants des comparaisons sur la période 2001-2006 194
4.2.1 La comparaison globale donne des résultats probants 194
4.2.2 Les résultats de la comparaison fine confirment la qualité satisfaisante des données 197
4.3 Les comparaisons globales et ponctuelles des lames d'eau *Panthere* sont satisfaisantes 204
4.3.1 La comparaison globale fournit des résultats probants 204
4.3.2 Les résultats de la comparaison ponctuelle se révèlent performants 205

5. Le recours à l'interpolation spatiale pour une couverture complète de données.....206
5.1 La validation croisée pour comparer le krigeage au cokrigeage..... 207
5.2 Confrontation visuelle des cumuls des hauteurs d'eau par pluviomètres et lames d'eau radar..... 209
Synthèse de la partie : une mesure radar dont la qualité a constamment progressé..... 213

Partie 2 : Le radar météorologique permet une étude fine de la dynamique descriptive de l'aléa pluvial..... 215
1. Un suivi des caractéristiques des noyaux de pluie intense par SIG.....216
1.1 Sélection des événements et identification des noyaux de pluie de forte intensité 219
1.1.1 Sélection des épisodes pluvieux et détermination de leur durée d'étude..... 219
1.1.2 Une analyse de sensibilité pour l'identification des noyaux de forte intensité . 219
1.2 Des statistiques spatiales pour suivre les caractéristiques des noyaux de forte intensité 226
1.2.1 Le centre moyen pondéré pour l'étude de l'intensité et de la superficie.... 226
1.2.2 L'ellipse directionnelle pour l'analyse de la forme et de la rotation..... 228
1.2.3 Le vecteur de déplacement pour le suivi de la vitesse et de la direction.... 229
1.2.4 Automatisation de la méthode par programmation d'un modèle de traitement 231
2. Application de la méthode aux épisodes intenses et mise en évidence de comportements similaires 234
2.1 Episode du 09 septembre 2002..... 234
2.1.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs..... 234
2.1.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité 238
2.2 Episode du 19 septembre 2002..... 246
2.2.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs..... 246
2.2.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité 249
2.3 Episode du 23 juillet 2004..... 254
2.3.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs..... 254
2.3.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité 256
2.4 Episode du 04 août 2004 261
2.4.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs..... 261
2.4.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité 263
2.5 Episode du 29 juillet 2005..... 267
2.5.1 Analyse spatiale de la répartition des centres moyens et des vecteurs..... 267
2.5.2 Analyse statistique des caractéristiques des noyaux de forte intensité 269
2.6 Synthèse des résultats..... 275
2.6.1 Une répartition aléatoire des noyaux de pluie de forte intensité pour des trajectoires semblables ?..... 275
2.6.2 Des noyaux de forte intensité aux caractéristiques communes ? 279
Synthèse de la partie : des caractéristiques communes aux épisodes analysés..... 284

Chapitre 3 Les impacts de l'aléa pluvial sur le système d'assainissement nécessitent une évaluation de la vulnérabilité territoriale 287

Partie 1 : Mise en évidence de relations entre débordements et pluies 288
1. Une base de données fiable et puissante 290
1.1 Le contenu riche de la base de données « débordements du réseau d'assainissement par temps de pluie » 290

1.2 L'évaluation de la qualité des informations des bases de données permet une exploitation fiable 292
1.2.1 Confrontation de la base de données « débordements » aux valeurs pluviométriques 293
1.2.2 Confrontation de la base de données « débordements » à la base de données « Progrès » 295
1.2.3 Confrontation de la base de données « débordements » à la base de données « SDIS » 298
2 Relations entre débordements et types de pluies 301
2.1 Des distributions spatiales et des répartitions temporelles prévisibles 301
2.2 Quels débordements pour quels types de pluies ? 306
2.3 L'influence des types de pluie dans la localisation des débordements 310
2.3.1 Les débordements durant les pluies intenses affectent le centre de l'agglomération 311
2.3.2 L'ouest du Grand Lyon est touché par les pluies abondantes et longues ... 312
2.3.3 Les débordements de pluies ordinaires se concentrent à l'est 315
2.4 L'influence notable des composants du système dans la localisation des débordements 318
2.4.1 Quantification et distribution spatiale des débordements en fonction du type de réseau 318
2.4.2 Quantification et distribution spatiale des débordements en fonction des éléments constitutifs du réseau 325
2.5 Analyse spatiale croisée des débordements en fonction du type d'ouvrage et de la pluie 329
3 Comparaison spatiale entre débordements observés et modélisés 333
3.1 La nécessité de recourir à la modélisation du réseau d'assainissement du Grand Lyon 333
3.1.1 Contexte de la modélisation du réseau 333
3.1.2 Le logiciel de modélisation du réseau : Canoe 334
3.1.3 Modélisation du réseau d'assainissement : principe 334
3.1.4 Construction du modèle général du réseau d'assainissement 335
3.1.5 Calage des modèles et limites des simulations 336
3.1.6 Principe de la confrontation des débordements modélisés aux débordements observés 337
3.2 Les résultats de la comparaison spatiale sont convaincants 340
3.2.1 Une forte correspondance spatiale entre modélisation et observation 340
3.2.2 Des débordements simulés sur des zones où les observations sont absentes 342
3.2.3 Des décalages entre modélisation et observation sur le bassin versant de Saint-Fons 344
3.2.4 Des observations de terrain sans équivalents modélisés 345
Synthèse de la partie : les débordements dépendent fortement du type de pluie 345

Partie 2 : Une méthode hiérarchique multicritère d'aide à la décision pour l'analyse de la vulnérabilité territoriale 348
1. La diversité des évaluations de la vulnérabilité urbaine 349
1.1 Limites des études de vulnérabilité urbaine 349
1.2 Sur le Grand Lyon : des études antérieures incomplètes 350
2 La nécessité de recourir à des méthodes d'aide à la décision 354
2.1 Diversité de sensibilité et de potentiel stratégique des enjeux 354
2.2 Principes méthodologiques des méthodes multicritères d'aide à la décision 356

2.2.1 Des méthodes nombreuses pour des objectifs différents 356
2.2.2 Choix et justification d'une méthode d'agrégation 358
2.2.3 Choix et justification d'une méthode de pondération 358
3 Principes méthodologiques de l'AHP et application au territoire d'étude 362
3.1 Description et hiérarchisation structurée du système 362
3.1.1 Enjeux, facteurs de sensibilité et impacts 362
3.1.2 Structuration des enjeux matériels, environnementaux et humains 364
3.1.3 Base de données utilisées et évolutivité 366
3.2 Le recours aux jugements d'experts pour le calcul des priorités 367
3.3 Résultats et établissement des fonctions de priorités 369
3.4 De la méthodologie au SIG : réflexion sur le cadre d'étude et établissement de facteurs de quantification 373
4 Une vulnérabilité centrée sur le cœur urbain 377
4.1 Application cartographique de l'*AHP* et interprétation de la variabilité spatiale de la vulnérabilité 377
4.2 Le SIG pour souligner les interactions entre aléa et vulnérabilité 382
4.3 Limites et évolutivité de la méthode proposée 384
Synthèse de la partie : une plus forte vulnérabilité dans le centre urbain avec des îlots en périphérie à ne pas négliger 387

Conclusion générale 389

Références bibliographiques 397

Liste des figures 429

Liste des tableaux 441

Annexes 445

Table des matières 523